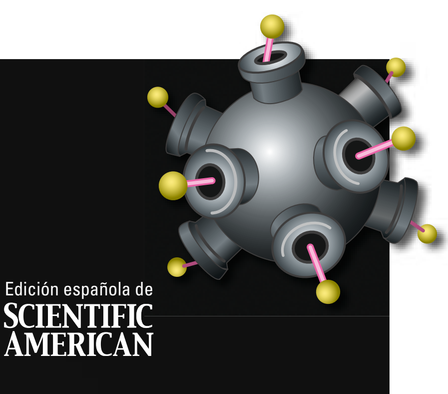
ABRIL 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

GEOLOGIA
Megaterremotos en Cachemira

FISICA
Materiales con propiedades magnéticas insólitas

MEDIOAMBIENTE
¿Resulta contaminante nuestra alimentación?

MEDICINA
Nanofármacos para vencer el cáncer

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

SINGULARIDADES DESNUDAS

Aunque afines a los agujeros negros, serían todavía más extrañas

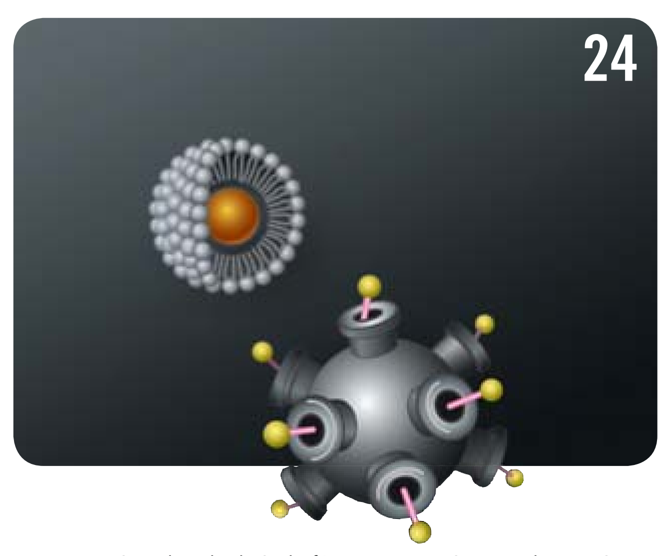


SUMARIO

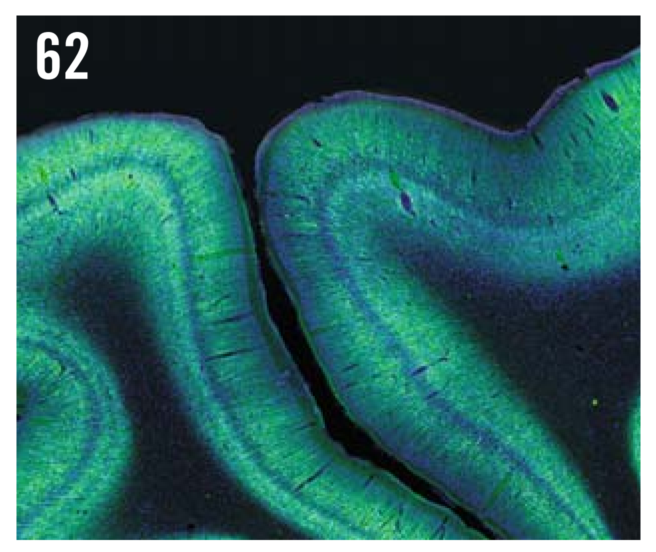
Abril de 2009/ Número 391



Con un pequeño pero constante empuje, los cohetes de plasma pueden llegar más lejos en menos tiempo.



La nanotecnia reduce la dosis de fármaco necesaria para el tratamiento.

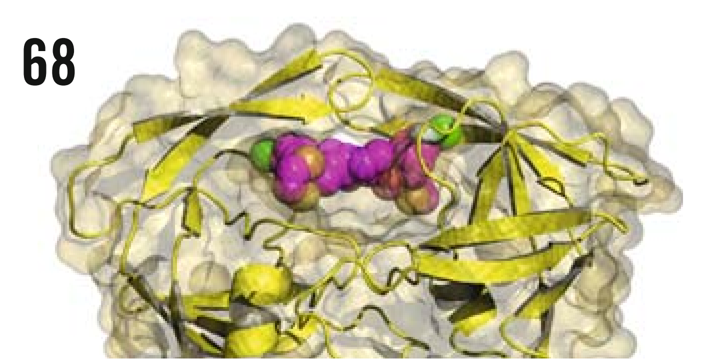


La única forma de que la corteza cerebral encaje en la caja craneana es plegándose.

ARTICULOS



No siempre tendría que existir el horizonte que aísla del resto del universo al interior de los agujeros negros.



Buena parte de la exquisita precisión con que operan las proteínas se debe a su plasticidad.



Las crónicas enseñan acerca de pasados y futuros terremotos en Cachemira.

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Peter Brown, Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares y Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
MANAGING EDITOR, ONLINE Ivan Oransky
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin Hause

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Singularidades desnudas*; J. Vilardell: *Cohetes eléctricos*, *Hace...*, *Ideas aplicadas* y *Curiosidades de la física*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *Líquidos y hielos de espín, Morfología del cerebro* y *Puesta al día*; Marián Beltrán: *Alimentación y efecto invernadero* y *Desarrollo sostenible*; Sònia Ambròs i Albesa: *Megaterremoto en el Valle de Cachemira*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*



Portada: Kenn Brown, Mondolithic Studios

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



Copyright © 2009 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2009 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

¿Planeta o fugitivo? «En su breve relación con Plutón, los astrónomos han comenzado a dudar de que se trate de un planeta genuino. Su excéntrica órbita está considerablemente inclinada respecto al plano de la eclíptica, en el que yacen las órbitas de los demás planetas. Incluso durante su máximo acercamiento a nuestra zona del sistema solar, no se muestra más luminoso que Tritón, uno de los dos satélites de Neptuno, lo que sugiere que no es mayor que él. Se sospecha que Plutón sea un vástago ilegítimo de Neptuno, un satélite que se habría escapado, tal como lo hicieron hace poco dos satélites de factura humana, para recorrer su propia órbita alrededor del Sol. —Owen Gingerich»

El agujero más hondo. «La corteza terrestre es una capa relativamente fina que se extiende por encima del interior del planeta. Su espesor medio es de unos dieciséis kilómetros, sólo una cuadringentésima parte del radio de la Tierra. Bajo la corteza se halla el manto, del que se ignoran detalles importantes de su composición y naturaleza. Esas características pueden determinarse sólo por examen directo. En el límite entre la corteza y el manto se encuentra la discontinuidad de Mohorovicic, conocida por los geólogos como el Moho. Para conseguir una muestra del manto, hay que abrir un orificio a través del Moho: un Mohole. —William Bascom»

[NOTAS: "Hole" significa "agujero" en inglés, de ahí el juego de palabras en "Mohole". Los trabajos de perforación del Mohole se abandonaron en 1966.]

...cien años

Un dinero más liviano. «Experimentos de abrasión llevados a cabo en la Casa de la Moneda de Francia demostraron que las monedas de aluminio se desgastan menos por el uso que las de oro, plata e incluso que las de bronce. Otra ventaja del metal es su poquísimo peso: es cuatro veces más ligero que la plata. Por ello, las monedas de aluminio podrían transportarse en grandes cantidades sin dificultad. Se estima en 56 millones de francos el circulante nominal total en piezas de 5 y de 10 céntimos. Se ha propuesto sustituir unos 50 millones de francos de ese total por monedas de aluminio de la misma denominación. Para ello harán falta unas 2000 toneladas de aluminio en primordios de troquel a 97 céntimos el kilo.»

Reconocimiento de voz. «Objeto de una invención ha sido una cerradura de seguridad dotada de un mecanismo fonográfico que abre sólo la voz del propietario. En la puerta hay un micrófono como el de un teléfono ocupando el lugar del pomo, provisto de la aguja habitual, la cual recorre un surco del registro sonoro del cilindro del fonógrafo. Para destrabarse la cerradura, quien hizo la grabación original debe pronunciar ante el cilindro la contraseña. No se informa de lo que ocurriría si el dueño se presentara en la oficina con un fuerte catarro.»



Agencia de patentes de SCIENTIFIC AMERICAN, Nueva York, 1859.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XIV, N.º 32; 16 DE ABRIL DE 1859

...ciento cincuenta años

Hablando de aluminio. «Hace sólo unos pocos años este preciado metal era poco corriente y caro, a causa sobre todo de las dificultades para reducirlo desde su óxido. Hace unos tres años, su valor de mercado no bajaba de los 635 dólares el kilogramo. En una remota región del mundo (la costa occidental de Groenlandia) se han descubierto grandes cantidades de un mineral de aluminio, de nombre criolita, del que puede extraerse el metal a un precio reducido; el señor Gerhard ha levantado recientemente una factoría en Battersea (Inglaterra) para ese propósito. Ya ha vendido el metal a unos 35 dólares el kilo. El aluminio es el más ligero de todos los metales, cualidad que lo hace recomendable para acuñar unas monedas que remplacen a las de valores inferiores.»

Agencia de patentes. «La Oficina de Patentes de Estados Unidos, ubicada en Washington, constituye el almacén y el monumento al ingenio de nuestros conciudadanos. A causa del valor de muchos de los inventos para los que se solicitan patente y la importante necesidad de que la documentación sea cuidadosamente preparada, ha surgido una profesión, cuyos miembros suelen designarse como "oficiales de patentes" o "procuradores de patentes"; han llegado a hacerse tan necesarios para las gestiones ante la Oficina de Patentes como lo son los abogados ante los tribunales de justicia. Hacemos constar aquí, por lo que a nosotros atañe, que nadie se atreverá a negar que, desde 1846, el Departamento para la Agencia de Patentes de *Scientific American* ha examinado lo novedoso de más invenciones que cualesquiera otros agentes de patentes actualmente radicados en el país. Ofrecemos a nuestros lectores una ilustración con una vista del interior de la oficina de *Scientific American* y su agencia de patentes en Nueva York.»

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Vencer la rabia canina

Jeanna Giese se convirtió en 2004 en la primera persona en sobrevivir a una infección de rabia sin haberse vacunado. Rodney E. Willoughby, Jr., del Hospital de Wisconsin, la salvó mediante la inducción de un coma y la inyección de antivíricos [*véase* "¿Se puede curar la rabia?"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio 2007]. En otoño de 2008, este "protocolo de Milwaukee" pudo haber ayudado a una niña colombiana de 8 años y un adolescente brasileño a superar su terrible suerte.

La niña empezó a recuperarse mientras permanecía en coma; sin embargo, antes de despertarse, murió de una neumonía, sin relación con la rabia según sus médicos. El chico se está recuperando, pero no está del todo claro que ello se deba al protocolo, pues había seguido parte de un tratamiento antirrábico antes de presentar síntomas. (Otras cinco personas se han recuperado después de un tal tratamiento parcial.) Aunque los dos casos puedan suponer noticias positivas para el protocolo de Milwaukee, la investigación al respecto resulta controvertida y compleja. Hasta ahora, el único éxito claro es el caso de Giese.



2. VENCER LA RABIA: Jeanna Giese tras su recuperación.

Bioterrorismo en 2013

El temor a la liberación de patógenos mortales con la función de armas de destrucción masiva ha ido *in crescendo* desde los ataques del 11 de septiembre y los envíos postales de carbunco [*véase* "Armas biológicas"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 1997]. Tal riesgo es más probable que una detonación atómica, según una comisión del Congreso estadounidense, que en su informe del 2 de diciembre de 2008 afirma que es verosímil que hacia 2013 se produzca algún incidente de bioterrorismo. La suma de esfuerzos para poner los patógenos a buen seguro y para orientar a los expertos en armas biológicas hacia actividades más pacíficas funcionó en el pasado, pero tales programas deben reforzarse y ampliarse, declara la comisión.

Efectos religiosos

El genoma humano da testimonio de una historia de migraciones ancestrales [*véase* "Huellas de un pasado lejano"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre 2008]. Refleja también los efectos de la religión y las persecuciones. Se han estudiado los genes de 1140 varones de la península Ibérica; en concreto, su cromosoma Y, que cambia poco de padre a hijo. Los investigadores (entre los que se cuentan varios españoles) descubrieron que el 19,8 por ciento de la población ibérica moderna tiene antepasados judíos sefarditas. Ello refleja, probablemente, las purgas de las postrimerías del siglo XV y la conversión de judíos al cristianismo. El 10,6 por ciento tiene ancestros morunos, resultado, probablemente, de la conquista de la Península a partir de 711 d.C. Estos descubrimientos han sido publicados en el número de 12 de diciembre de *American Journal of Human Genetics*.



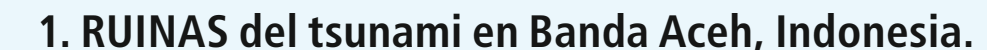
3. LA EXPULSION y conversión de los judíos asoma en los genes ibéricos.

Riesgo de nuevos tsunamis

Tras el devastador tsunami del Indico en 2004, los científicos se lanzaron a investigar sus causas y la posibilidad de que se produjese otra marea mortífera [*véase* "El tsunami del Indico"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2006]. Se descubrió que el tsunami había sido consecuencia de un terremoto de magnitud 9,2 con epicentro frente a las costas occidentales de Sumatra, en concreto, en la zona de subducción de Sunda, donde una placa tectónica se está introduciendo por debajo de otra. Los sismólogos conjeturaron que dos fuertes terremotos acontecidos allí en 2007 podrían haber liberado la energía acumulada, lo que evitaría un nuevo terremoto de gran magnitud.

Desdichadamente, hay malas noticias, llegadas del Instituto de Tecnología de California y de otras instituciones. Para evaluar cuánta fue el área fragmentada, en comparación con actividad pasada, se analizaron datos obtenidos por radar desde satélites y de estaciones GPS; se estudiaron también los patrones de crecimiento de arrecifes de coral y otros registros geológicos. Al parecer, los acontecimientos de 2007 liberaron sólo una cuarta parte de la energía mecánica atrapada allí. Los equipos investigadores informaron recientemente que podría producirse en cualquier momento otro terremoto que desencadene un nuevo tsunami.

—Charles Q. Choi



1. RUINAS del tsunami en Banda Aceh, Indonesia.



DARIO MITIDIERI *Getty Images (tsunami)*; GRANGER COLLECTION *(grabado del siglo XIX)*; MORRY GASH *AP Photo (Giese y su familia)*

BIOLOGIA

Mosquitos y virus

¿Por qué los mosquitos pueden ser portadores de virus mortales, como el virus del Nilo Occidental y el dengue, sin sucumbir a ellos? La teoría más aceptada hasta ahora mantenía que los virus y los mosquitos evolucionaron para vivir en armonía. Sin embargo, se ha encontrado que lo cierto es precisamente lo contrario. Al infectar mosquitos con un virus de prueba, se vio que el sistema inmunitario de los insectos fragmentaba el material genético del patógeno; el animal se libraba. En cambio, cuando los mosquitos quedaban expuestos a una versión del virus, genéticamente modificado, que bloqueaba el mecanismo de fragmentación del material genético, los insectos no podían atacar el invasor y perecían a una velocidad más de cuatro veces mayor. Este descubrimiento podría conducir al descubrimiento de antivirales que imiten los trucos antivirus de los mosquitos.

—Susannah F. Locke



VECTOR VIRICO: El sistema inmunitario de los mosquitos mantiene a raya a los virus letales.

PLANETAS

Dióxido de carbono exoplanetario

El Telescopio Espacial Hubble ha descubierto dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera de un planeta allende nuestro sistema solar. Se trata de HD 189733b, que tiene aproximadamente la masa de Júpiter y se encuentra a 63 años luz de distancia. Se ha determinado la composición de su atmósfera comparando el espectro luminoso procedente de la estrella con el espectro de la estrella y el planeta combinados. Además del CO_2, los datos revelan la presencia de monóxido de carbono; estudios anteriores habían señalado la de vapor de agua y metano. Aunque HD 189733b, cuya órbita está muy cerca de su estrella, es demasiado caluroso y gaseoso para la vida tal como la conocemos, este descubrimiento muestra que existen técnicas para encontrar marcadores de vida en otros mundos.

—John Matson

ASTRONOMIA

Exito en el seguimiento de asteroides

Se ha seguido por primera vez la trayectoria de un pequeño asteroide (de unos metros de tamaño) antes de que colisionara con la Tierra. Un telescopio, cercano a Tucson, que participa en el *Catalina Sky Survey* (Estudio del Cielo Catalina), dedicado a la localización de objetos próximos a la Tierra que puedan llegar a chocar con ella. El 6 de octubre detectó el objeto, bautizado 2008 TC3. Se predijo, correctamente, que la roca espacial entraría en la atmósfera a 12,8 kilómetros por segundo sobre el norte de Sudán a las 5:46 de la mañana (hora local) del día siguiente y que liberaría un kilotón de energía. Objetos de este tamaño impactan contra la Tierra una vez cada pocos meses.

—Philip Yam





DATOS

Vidas truncadas

Los elefantes de zoológico tienen vidas mucho más cortas que sus congéneres salvajes, según datos correspondientes a unos 4500 elefantes de zoológicos europeos y de refugios de fauna salvaje. Además, la mortalidad infantil es más alta en los animales en cautividad, especialmente entre los paquidermos asiáticos, lo cual sugiere que hay algún factor que aumenta el riesgo durante la gestación y la primera infancia para los animales nacidos en cautividad. Sin embargo, es posible que estos datos no reflejen las prácticas más recientes de los parques zoológicos, que se preocupan mucho más del bienestar de los animales.

Esperanza de vida, en años:

	En los zoológicos	En libertad
Elefantes africanos:	16,9	56
Elefantes asiáticos:	18,9	41,7

Porcentaje de crías nacidas en embarazos primerizos que no sobreviven a su primer año de vida:

	En los zoológicos	En libertad
Elefantes africanos:	25,9	18,7
Elefantes asiáticos:	58,3	17,4

FUENTE: Science, *12 de diciembre de 2008*

GEOFF DU FEU *Getty Images (mosquito)*; MATT COLLINS *(dibujos)*

FISICA

Nuevo tipo de termómetro

Para los físicos, medir la temperatura es mucho más que mirar una columna de mercurio. Les gustaría definirla en términos de una constante física, al igual que la longitud se describe con respecto a la velocidad de la luz (un metro es la distancia que recorre la luz en el vacío absoluto en 1/299.792.458 segundo). Actualmente, la unidad básica de temperatura, el grado kelvin, se define, de forma un tanto tosca, como 1/273,16 de la diferencia entre el cero absoluto y el punto triple del agua, es decir, el punto en el que las fases sólida, líquida y gaseosa pueden coexistir a una cierta presión. Un grado kelvin abarca el mismo intervalo que un grado centígrado.

Ahora, se ha inventado un termómetro electrónico que vincula directamente la temperatura con un número fundamental, la constante de Boltzmann, relacionada con la energía cinética de las moléculas. Se basa en que el cambio de la conductancia eléctrica en una batería de uniones túnel (finas capas aislantes colocadas entre electrodos) es directamente proporcional a la constante de Boltzmann multiplicada por la temperatura.

Aunque la termometría por bloqueo de Coulomb, como se denomina esta técnica, se utiliza ya en algunos dispositivos especializados, las fluctuaciones en las propiedades electrónicas de las versiones existentes hacen que sean poco fiables a temperaturas muy bajas. El nuevo termómetro, creado en la Universidad Tecnológica de Helsinki, llega hasta los 150 milésimas de grado kelvin. Además, afirman que puede producirse en serie con métodos ordinarios de fabricación de semiconductores.

—Charles Q. Choi



MARTE

Glaciares bajo la superficie

En Marte hay enormes glaciares bajo finas capas de residuos corticales, según el radar de la Sonda Orbital de Reconocimiento de Marte, que traspasa la superficie planetaria. Como las condiciones actuales del Planeta Rojo en las zonas analizadas, entre 30 y 60 grados de latitud sur, no son las adecuadas para la formación de hielo, los glaciares probablemente se crearon en un pasado remoto, cuando las características climáticas de Marte eran diferentes. La capa de residuos protegió el hielo e impidió que se sublimase y convirtiera en vapor de agua. Estas formaciones de hielo podrían constituir la mayor reserva de agua de Marte fuera de sus áreas polares.

—John Matson

OCEANOS

Baño de ácido

Una consecuencia de que la atmósfera contenga altas proporciones de dióxido de carbono (CO_2) es la acidificación del agua. Los océanos absorben este gas de efecto invernadero. Captan alrededor de un tercio del dióxido de carbono liberado en la atmósfera por la actividad humana. Cuando el CO_2 se disuelve en el agua, forma ácido carbónico, la misma sustancia de las bebidas con gas. Nuevas investigaciones apuntan a que el agua del mar podría estar aumentando su acidez más rápidamente de lo que habían predicho los modelos del cambio climático.

El grupo encabezado por J. Timothy Wootton, de la Universidad de Chicago, empleó ocho años en recopilar medidas de la acidez, salinidad, temperatura y otras características de la isla Tatoosh, frente a la punta noroeste del estado de Washington. Encontraron que la acidez media aumentó a un ritmo décuple del predicho por las simulaciones climáticas.

Un agua con altos niveles de acidez puede causar graves daños a la fauna marina. Disuelve el carbonato cálcico de las conchas y de los arrecifes de coral. Wootton y su equipo han descubierto que el equilibrio de los ecosistemas había cambiado: las poblaciones de animales con conchas grandes, como los mejillones y los percebes, se redujeron, mientras que las especies con conchas más pequeñas y las algas no calcáreas (especies que carecen de esqueletos basados en el calcio) se hicieron más abundantes.

Wootton señala que los cambios que percibió su equipo estaban vinculados a los crecientes niveles de CO_2 atmosférico, pero reconoce que este gas podría no ser el causante principal del aumento de la acidez. En efecto, la acidificación observada por los investigadores podría obedecer a una emanación cercana de aguas oceánicas profundas cargadas de carbono, de manera que los resultados podrían no ser aplicables a la totalidad de los océanos. En cualquier caso, los niveles de acidez parecen estar aumentando en toda la costa del Pacífico de los Estados Unidos y en la costa de los Países Bajos, afirma Wootton, "en concordancia con las pautas que hemos encontrado".

—Charles Q. Choi



LOS CORALES y otras especies marinas ricas en carbonato cálcico llevan las de perder a medida que aumenta la acidez de los mares.

STEVE BRONSTEIN *Getty Images (termómetro)*; CHRIS NEWBERT *Minden Pictures (coral)*

El genoma del mamut

Se ha secuenciado la mitad del genoma del mamut lanudo

Unos 10.000 años después de que el último mamut lanudo trotara por la tundra, se ha secuenciado la mitad de su genoma nuclear. Hasta ahora sólo se habían leído pequeños fragmentos del ADN de estos animales de la edad de Hielo. Nunca antes se había recuperado un porcentaje tan alto del material genético de un organismo extinto. Este logro no sólo nos proporciona información sobre la historia evolutiva del mamut, sino que además constituye un paso hacia el sueño de resucitar una especie desaparecida hace largo tiempo.

Un grupo de investigadores dirigido por Webb Miller y Stephan C. Schuster, de la Universidad estatal de Pennsylvania, extrajo ADN del pelo de dos ejemplares de mamut lanudo siberiano y lo introdujo en una máquina que realiza una secuenciación "de alta productividad". Antes, la mayor cantidad de ADN tomada de una especie extinta estaba formada por 13 millones de pares de bases, ni siquiera un 1 por ciento del genoma. El equipo afirma que ha obtenido más de tres mil millones de pares de bases.

Aunque la interpretación de la secuencia está aún en sus comienzos, los resultados han descartado ya una atribución muy arraigada sobre el pasado del proboscidio. Creíase que el mamut lanudo era la última de una sucesión de especies en la que cada una engendraba a la siguiente y en cada momento no había más que una especie. En cambio, el ADN nuclear de los dos ejemplares de mamut cuyo genoma se ha leído era muy diferente en cada espécimen. Parecen pertenecer a poblaciones que se separaron entre 1,5 y 2 millones de años antes de nuestra era. Ese hallazgo confirma los resultados de un estudio reciente de la secuencia de ADN de los orgánulos productores de energía de la célula, el ADN mitocondrial. Y daba a entender que hubo a la vez diversas especies de mamut lanudo. Según Ross D. E. MacPhee, del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, parece que se produjo una especiación que en el registro fósil había estado pasando inadvertida.

Hasta el momento, del genoma del mamut se conocen fragmentos inconexos, aún por ensamblar. Los expertos se hallan a la espera de que acabe la secuenciación del genoma del elefante de la sabana africana, un primo del mamut lanudo, que valdrá de guía para reconstruir el genoma del animal extinto.



El mamut lanudo y muchos otros grandes mamíferos se extinguieron hace 10.000 años por razones que aún se desconocen.

JONATHAN BLAILR *Corbis*

Armados con los genomas completos del mamut y de su pariente vivo más cercano, el elefante asiático, algún día se podrá quizá revivir al mamut. Schuster afirma que hasta hace un año revivir la especie le habría parecido una pura fantasía; pero tras este logro en la determinación de la secuencia piensa que, al menos en teoría, podría modificarse el ADN de un óvulo de elefante para que correspondiese al del mamut mediante las sustituciones apropiadas en el código genético. Basándose en comparaciones iniciales del ADN del mamut y del elefante, calcula que unos 400.000 cambios darían lugar a un animal con el aspecto de un mamut; para conseguir una reproducción perfecta, se necesitarían varios millones de cambios.

La reciente clonación de ratones congelados no es aplicable al mamut lanudo. Los ratones son pequeños y se congelan rápidamente; un mamut, en cambio, tardaría varios días en congelarse, lapso en el que quizás el ADN se degradase demasiado para que hoy se pudiera efectuar la clonación.

A más corto plazo, se espera descubrir cómo se adaptó el mamut lanudo a su gélido mundo y qué factores promovieron su desaparición. Estudiando los genomas de numerosos ejemplares de mamut pertenecientes a períodos diferentes, se podrá describir la reducción de su diversidad genética a medida que la especie se fue extinguiendo. La desaparición del mamut y otras especies podría enseñarnos lecciones que ayuden a la conservación de animales modernos en peligro de extinción.

Actualmente, el equipo está determinando la secuencia del ADN de un tigre de Tasmania o tilacín, un marsupial australiano que se extinguió en 1936, probablemente como resultado de una infección. Quieren comparar su ADN con el de su pariente cercano, el demonio de Tasmania, que actualmente está amenazado por un devastador cáncer facial.

"Esperamos llegar a saber por qué una especie se extinguió y la otra no, y después utilizar ese conocimiento en nuestros esfuerzos por conservar especies en peligro", afirma Miller. Si la investigación descubriese genes asociados a la supervivencia, cabría desarrollar un programa de cría del demonio de Tasmania que maximizase la diversidad genética de la población y aumentara la frecuencia de los genes que confieren inmunidad. La mayor esperanza que suscita ADN antiguo no es, pues, resucitar lo extinto, sino preservar a los vivos.

Kate Wong

Ser mujer en El Argar

El estudio de los ajuares funerarios arroja luz sobre la dimensión social de la identidad femenina en la cultura argárica

Con la expresión "cultura argárica" nos referimos a un conjunto de comunidades prehistóricas que vivieron en el sudeste de la península Ibérica durante la Edad del Bronce (aproximadamente entre 2250 y 1450 a.C., en fechas calibradas).

Fueron los hermanos Enrique y Luis Siret, dos ingenieros belgas de minas, quienes, a finales del siglo XIX, dieron ese nombre a los restos arqueológicos hallados durante sus prospecciones en la zona. Desde entonces, esta cultura prehistórica ha sido una de las más atendidas por la investigación arqueológica peninsular. Conocemos ya aspectos muy dispares de las comunidades argáricas: lugares de habitación, artefactos empleados y ritos funerarios.

Aunque con excepciones, los poblados argáricos se ubicaban en montículos o elevaciones de fácil defensa, en cuyas laderas se emplazaban las viviendas. Enterraban a los muertos en el subsuelo del hogar (en cistas, fosas, urnas cerámicas y covachas excavadas en la roca). Los lugares de vida y muerte confluían así en un mismo espacio. Los enterramientos suelen corresponder a inhumaciones individuales, aunque se han hallado también tumbas dobles y, con menor frecuencia, triples y cuádruples.

Muchas de estas tumbas contenían ajuares funerarios, muy variados en cuanto a la cantidad y a la calidad de los objetos. Encontramos adornos metálicos, óseos y líticos, vasos cerámicos, espadas y alabardas metálicas, y utensilios, en general de manufactura metálica, empleados en actividades productivas diversas. Aunque la mayoría de los elementos se depositaron de forma indistinta en tumbas masculinas y femeninas, unos pocos aparecen asociados de manera exclusiva a uno u otro sexo.

La investigación sobre El Argar se ha centrado en la enorme disparidad de los ajuares funerarios para proponer una fuerte estratificación en las clases sociales: elites guerreras en la cúspide de la pirámide social y grupos de esclavos o siervos en el escalafón más bajo.

Nuevos análisis del registro funerario han ahondado en las dimensiones sociales de las diferencias de género, edad e identidad en el núcleo de las comunidades argáricas. A partir del estudio de los ajuares funerarios, se ha propuesto la adscripción de distintos tipos de identidad a hombres y mujeres argáricos, bajo la premisa de que los objetos elegidos para enterrar a los muertos guardaban relación con la percepción social que se tenía de ellos en vida y con su identidad social.

En concreto, se ha indagado sobre la asociación reiterada, independiente de la posición social, que existe entre las tumbas de mujeres y los punzones (fenómeno ya apuntado desde las primeras investigaciones argáricas). Los punzones constituyen la única herramienta de adscripción sexual exclusiva que aparece a lo largo de todo el período argárico; se documenta también en tumbas infantiles, probablemente de niñas, y aparece con cierta frecuencia en contextos no funerarios.

Resulta llamativo que la aparición en el registro funerario de estos utensilios atraviese todas las circunstancias sociales menos el género. Quizás esta presencia recurrente guarda relación con las actividades que llevaron a cabo las mujeres argáricas. Aunque desconocemos el uso exacto que recibieron los punzones argáricos, los datos textuales y etnográficos sitúan estos utensilios en el desarrollo de una serie de "actividades de mantenimiento".

Las actividades de mantenimiento corresponden a prácticas cotidianas recurrentes, que regulan y estabilizan el ciclo de la vida diaria en una comunidad y posibilitan la continuidad de ésta en el tiempo. Relacionadas sobre todo con el cuidado de los miembros del grupo, las actividades culinarias, textiles, higiénicas y sanitarias, la socialización de niños y niñas, así como la organización y acondicionamiento de los espacios relacionados requieren todas ellas el desarrollo de redes sociales. Quienes desempeñan ese tipo de actividades suelen



1. Los punzones constituyeron una herramienta de adscripción sexual exclusiva durante el período argárico. Las mujeres utilizaban el punzón para expresar simbólicamente su identidad. El de la imagen procede de El Rincón de Almendricos.





2. Ajuar funerario (*izquierda*) y cráneo con diadema (*derecha*) de la cultura argárica.

H. SIRET Y L. SIRET, "LES PREMIERS ÂGES DU METAL DANS LE SUD-EST DE L'ESPAGNE", 1887 (*ajuar funerario y cráneo*)

construir su identidad personal a partir de la relación con los otros miembros de la comunidad. Es, por tanto, el carácter relacional lo que constituye la identidad personal.

Creemos que la presencia de los punzones en los ajuares argáricos guarda relación con la necesidad simbólica de denotar en el ritual funerario una identidad femenina transversal y relacional. Una identidad basada en la práctica de las actividades de mantenimiento, que habrían llevado a cabo, si no todas, buena parte de las mujeres argáricas. Así, la cultura material integrada en las prácticas de mantenimiento cotidianas operaría a modo de significante simbólico de la identidad femenina en el ritual funerario. Los punzones se convertirían en un nexo de unión que denotaría continuidad en varios ámbitos: continuidad cronológica durante todo el período agárico, continuidad a lo largo y ancho de la escala social, y continuidad entre el contexto doméstico de la vida y el de la muerte.

Por descontado, la hipótesis anterior no implica que las mujeres argáricas integrasen un conglomerado social monolítico. Debieron de existir adscripciones sociales diversas, como se desprende de las diferencias en la calidad y cantidad de los ajuares funerarios femeninos: se infiere también de la manufactura de los punzones en plata y hueso. Las mujeres argáricas habrían escogido los punzones para representar de forma simbólica una de estas adscripciones sociales. Ello refleja la visión que tenían de sí mismas en el contexto que les tocó vivir; una manera de concebirse forjada a partir de las actividades desempeñadas y, por tanto, dominada por las relaciones con los otros, la recurrencia en el tiempo y la vinculación a los espacios fijos.

Sandra Montón Subías
Profesora de investigación ICREA
Depto. de Humanidades
Universidad Pompeu Fabra
Barcelona

Calorías y cáncer

Una dieta hipocalórica protege de la carcinogénesis ambiental

El envejecimiento se caracteriza por un deterioro tisular y orgánico, consecuencia de la disfunción de las enzimas que regulan el metabolismo. Amén de los cambios externos, se producen durante el envejecimiento otras alteraciones profundas con consecuencias más graves: trastornos neurológicos, enfermedades neurodegenerativas, hipotonía, sordera e incremento de la incidencia del cáncer.

A principios del siglo pasado, Peyton Rous, del Instituto Rockefeller de Investigación Médica en Nueva York, demostró que una dieta equilibrada y baja en calorías ejercía en los animales de experimentación una influencia positiva en la prevención del cáncer inducido. La dieta hipocalórica opera también una influencia positiva sobre el envejecimiento: alarga la vida en alrededor de un 30 por ciento. Los estudios sobre los efectos de la restricción calórica se han centrado sobre todo en el aumento de la longevidad, la disminución de la acción de la insulina y el aumento de la protección contra la carcinogénesis espontánea e inducida (ambiental).

Uno de los aspectos asociados a la carcinogénesis corresponde al estrés oxidativo: la producción excesiva de especies reactivas del oxígeno. La generación de estas moléculas tóxicas responde a numerosas causas: entre otras, la sobrealimentación y la exposición a ciertos agentes químicos y ambientales. El organismo dispone de mecanismos protectores (enzimas antioxidantes o detoxificantes), que eliminan o previenen la formación de especies reactivas del oxígeno.



Ejemplares machos de ratones en los que se ha silenciado *Nrf-2*.

Ante la presencia de un agente causante de estrés, las células responden mediante la activación de una ruta de protección iniciada por el factor Nrf-2. Este péptido corresponde a un factor de transcripción: se une a una secuencia específica de nucleótidos de ciertos genes que codifican enzimas antioxidantes. Denominamos a esa secuencia “elemento de respuesta antioxidante” (ARE). La activación de los genes que contienen la secuencia aumenta la capacidad de protección antioxidante del organismo.

El factor Nrf-2 se activa mediante la restricción calórica y compuestos que, como el resveratrol, remedan los efectos de una dieta hipocalórica. La dieta baja en calorías y sus miméticos aumentan, pues, las defensas antioxidantes del organismo. El factor Nrf-2 es activado también por carcinógenos como la radiación ultravioleta de bajo nivel. Ello respalda la importancia de esta molécula en la protección contra la carcinogénesis.

Una de las enzimas cuyo gen contiene la secuencia ARE (y responde, por

tanto, a Nrf-2) es la NAD(P)H-quinona reductasa I (NQO1). Ratones en los que se ha silenciado el gen *NQO1* muestran mayor sensibilidad a la carcinogénesis química. De igual forma, ratones en los que se ha silenciado *Nrf-2* manifiestan una sensibilidad notable a la carcinogénesis química, debido a la pérdida de la expresión de las enzimas detoxificantes como la NQO1. El efecto anticarcinogénico de la restricción calórica se debe, pues, a Nrf-2 o, cuando menos, a la ruta antioxidante que se inicia con este factor de transcripción.

Se ha demostrado que una dieta hipocalórica produce el mismo aumento de la longevidad en ratones en los que se ha silenciado *Nrf-2* y en animales silvestres. Sin embargo, cuando a esos múridos transgénicos se les aplica un tratamiento con carcinógenos tópicos (de aplicación externa y local) sufren un aumento del número y el tamaño de los tumores generados, fenómeno que apenas ocurre en los animales silvestres. Así pues, el factor Nrf-2 no participa en la regulación de la longevidad pero sí en el efecto anticarcinogénico de la restricción calórica. Dado que Nrf-2 condiciona una respuesta contra el estrés oxidativo, se demuestra la participación de este tipo de estrés en la iniciación y progresión del cáncer ambiental.

Rafael de Cabo
Laboratorios de Gerontología Experimental. Instituto Nacional del Envejecimiento, Baltimore
Plácido Navas
Centro Andaluz de Biología del Desarrollo, Universidad Pablo de Olavide-CSIC, y CIBERER, Instituto de Salud Carlos III, Sevilla

Los óxidos eutécticos

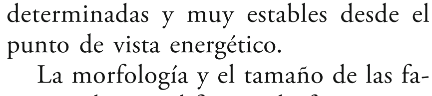
Su microestructura ordenada, compuesta de múltiples fases uniformes, los convierte en unos materiales ultrarresistentes

A partir del estudio de las relaciones entre el procesado, la microestructura y las propiedades de los óxidos eutécticos, se han logrado fabricar cerámicas mucho más resistentes que los aceros y con una estabilidad térmica excelente. Los trabajos han sido realizados en colaboración entre el grupo de procesado de materiales por láser del Instituto de Ciencias de Materiales de Aragón, el grupo de materiales estructurales avanzados y nanomateriales de la Universidad Politécnica de Madrid e Instituto Madrileño de Estudios Avanzados en Materiales (IMDEA-materiales).

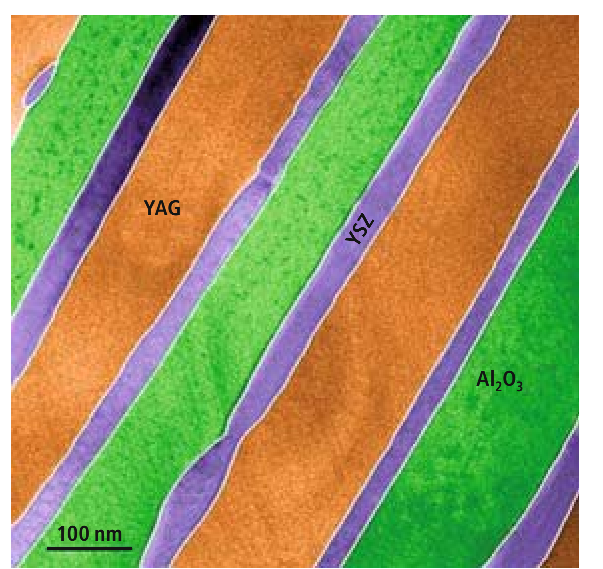
Las propiedades de los materiales vienen controladas en buena medida por la disposición espacial, el tamaño y la morfología de las fases que componen su microestructura. Para modificar el comportamiento de los materiales basta, pues, con actuar sobre las variables de procesado que controlan la microestructura.

Los óxidos eutécticos son materiales compuestos. Sus fases, de entre decenas de nanómetros y una decena de micras, se hallan distribuidas de manera uniforme y generan estructuras ordenadas. Los óxidos eutécticos se obtienen mediante solidificación direccional a partir del fundido. Pueden definirse como sistemas multifásicos generados por autoensamblaje y de densidad máxima.

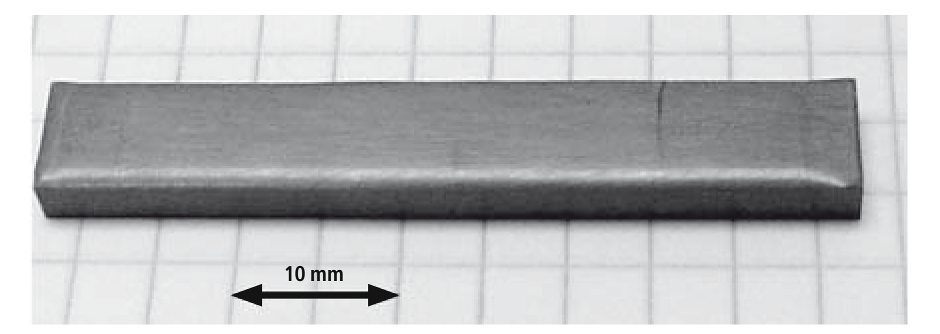
La estructura eutéctica es consecuencia del equilibrio termodinámico que se establece entre la tendencia al orden que minimiza la energía interfacial y el incremento de entropía asociado a la segregación de las fases que componen el material. Este proceso da lugar a un compuesto con un número elevadísimo de interfases limpias y libres de defectos, con unas relaciones cristalográficas bien determinadas y muy estables desde el punto de vista energético.



La morfología y el tamaño de las fases pueden modificarse de forma controlada mediante la variación de la velocidad de solidificación. Debido a su microestructura especial, los óxidos



◀ 1. Microscopía electrónica de transmisión de un corte longitudinal del ternario con alúmina, granate de ytrio y aluminio (YAG), y circona estabilizada con ytria (YSZ), Al_2O_3/YAG/YSZ, crecido a 1200 milímetros por hora mediante fusión zonal por láser.



▼ 2. Recubrimiento de alúmina, circona e ytria, Al_2O_3/$ZrO_2(Y_2O_3)$, sobre cerámica producido mediante fusión zonal por láser.

eutécticos fabricados por solidificación direccional presentan una tenacidad y resistencia mecánica muy superiores a las de materiales de composición semejante obtenidos mediante técnicas estándar; asimismo, estas propiedades mecánicas se mantienen hasta temperaturas muy elevadas. Además, la homogeneidad de la microestructura inhibe el engrosamiento homogéneo de las fases, lo que dota a los materiales eutécticos de una gran estabilidad térmica.

Compuestos de alúmina

En los últimos años, nuestros grupos de investigación han dirigido sus esfuerzos hacia el estudio de los eutécticos derivados de la alúmina (óxido de aluminio, Al_2O_3), por sus excelentes propiedades mecánicas. Los materiales se fabrican en forma de placas o barras delgadas, de unos pocos milímetros de diámetro, mediante la solidificación de un fundido producido con láser. El sistema formado por alúmina y granate de ytrio y aluminio ($Y_3Al_5O_{12}$ o YAG), Al_2O_3/YAG, presenta una resistencia mecánica excepcional, que se mantiene hasta temperaturas superiores a 2000 K. Otro sistema de interés es el formado por alúmina y óxido de zirconio, o circona: Al_2O_3/ZrO_2. Aquí, la adición de óxido de ytrio, o ytria (Y_2O_3), introduce el sistema pseudobinario $Al_2O_3/ZrO_2(Y_2O_3)$, que permite incorporar los diferentes polimorfos de la circona; ello da lugar a una riquísima variedad de morfologías microestructurales y de comportamientos mecánicos y funcionales.

En fecha reciente, hemos investigado el ternario de Al_2O_3/YAG/YSZ (donde YSZ se refiere a la "circona estabilizada con ytria") para refinar su microestructura. Se ha logrado fabricar un óxido nanoeutéctico formado por haces de fibras con una sección inferior a 200 nanómetros, que presenta una resistencia excepcional a la flexión, cercana a 5 gigapascales (GPa). La microestructura de estos materiales nanoeutécticos consta de fibras con una longitud del orden del milímetro y una sección inferior a 200 nanómetros (*véase la figura 1*). El material nanoestructurado se obtiene mediante la solidificación, a altas velocidades de crecimiento, de eutécticos ternarios de la familia Al_2O_3/YAG/YSZ o semejantes, en los que se ha sustituido el Y_2O_3 por Gd_2O_3 (óxido de gadolinio) o Sm_2O_3 (óxido de samario), que contienen como fase a las perovskitas $GdAlO_3$ y $SmAlO_3$, respectivamente.

Recubrimientos

En paralelo con la búsqueda de composiciones noveles con mejores prestaciones, es necesario el desarrollo de técnicas que permitan producir estos materiales en formas directamente utilizables en capas, recubrimientos y otros dispositivos. La mayor dificultad para lograr dicho objetivo estriba en encontrar un procedimiento que permita la integración de un material denso, como son los eutécticos solidificados direccionalmente, en otra pieza terminada de metal o cerámica.

Mediante las técnicas de solidificación unidireccional en superficie y con el apoyo de los métodos de simulación del procesado, se han obtenido placas sin grietas ni defectos que están dando muy buenos resultados en pruebas de erosión y desgaste (*véase la figura 2*). También se han ensayado con éxito procedimientos de fabricación de recubrimientos con cerámicas eutécticas sobre metales y cerámicos; por ese camino se busca incrementar la dureza y resistencia al desgaste, así como ofrecer una protección superficial frente a la oxidación que permita emplear estos materiales en aplicaciones estructurales a temperaturas elevadas en máquinas y sistemas de producción de energía.

Víctor Orera
Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC, Universidad de Zaragoza

Javier Llorca
Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid e Instituto Madrileño de Estudios Avanzados en Materiales (IMDEA-materiales)

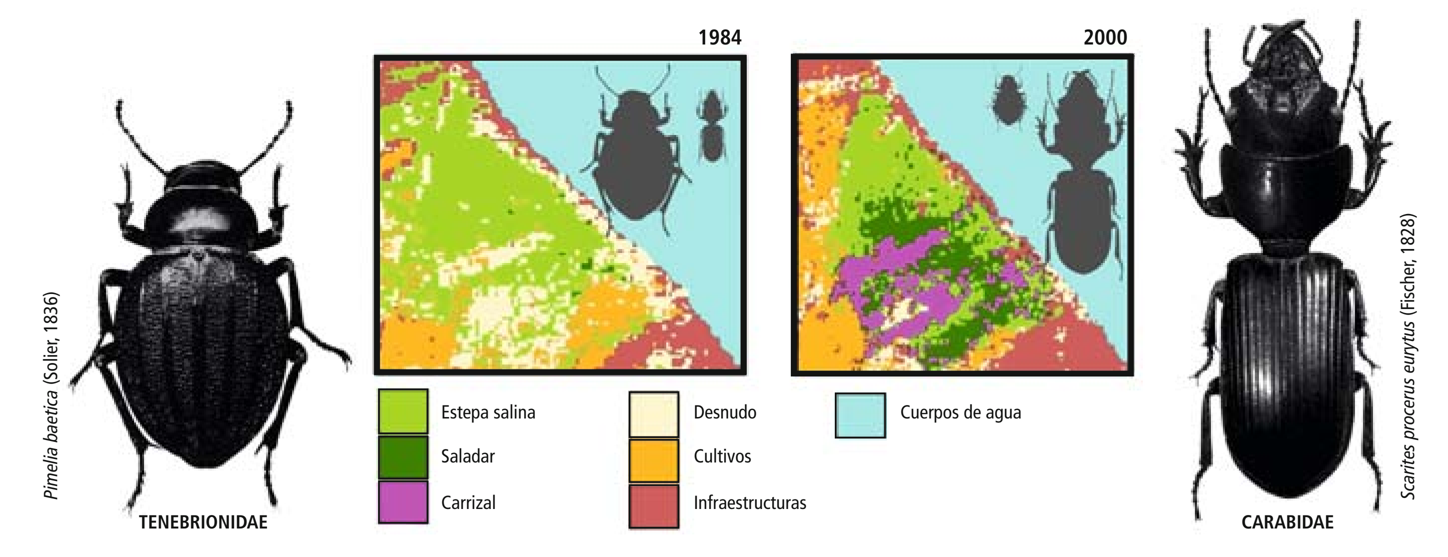
Indicadores biológicos y transformación del territorio

Los coleópteros, mensajeros de los cambios paisajísticos en zonas áridas

Los cambios en los usos del suelo forman parte del cambio global que experimenta la Tierra, junto con otras alteraciones ambientales severas, como el cambio climático, la erosión genética, la intensificación del ciclo del nitrógeno o el deterioro de los sistemas de control de la radiación ultravioleta. Todas ellas suelen estar interconectadas por sólidos bucles de retroalimentación. Las intensas modificaciones que sufren nuestros paisajes están comprometiendo gravemente la biodiversidad y los servicios ecológicos que nos ofrece la naturaleza. El entorno de la laguna del Mar Menor y sus humedales asociados, en la costa del sudeste ibérico, es un buen ejemplo.

El complejo de humedales de laguna del Mar Menor (Murcia) posee un gran interés ambiental y cuenta con diversas figuras de protección nacionales e internacionales. Sin embargo, su biodiversidad se halla amenazada por las alteraciones hidrológicas inducidas por los cambios de uso en la cuenca. Además de la presión de origen urbanístico, el aumento de los drenajes agrícolas por el incremento del regadío está transformando los hábitats y comunidades biológicas de la laguna del Mar Menor y sus humedales periféricos. Entre las comunidades afectadas están las de los carábidos y los tenebriónidos.

Estas familias de coleópteros parecen reaccionar bien ante los procesos de perturbación ambiental. Se conoce la respuesta de los carábidos a las prácticas agrícolas y los cambios de humedad; a los tenebriónidos se los ha utilizado como indicadores en sistemas áridos. Sin embargo, está menos estudiada su sensibilidad a procesos que ocurren a escalas espaciales mucho más amplias. ¿En qué medida la fauna de insectos de



Las transformaciones del territorio entre 1984 y 2000 han venido acompañados por un cambio muy considerable en las densidades relativas de las poblaciones de carábidos y tenebriónidos, representado en la ilustración por el diferente tamaño de los insectos.

los humedales y estepas salinas nos informa de los cambios ocurridos a escala de cuenca? Se han analizado los cambios en la actividad y estructura de las comunidades de carábidos y tenebriónidos en el humedal Marina del Carmolí, en la ribera del Mar Menor, ocurridos en los últimos veinte años, para establecer cómo responden ante las variaciones de humedad y salinidad provocadas por el incremento del regadío en la cuenca.

El análisis de la información aportada por los muestreos realizados en 1984, 1992 y 2003 reveló cambios significativos. El incremento de los drenajes agrícolas dio lugar a aumentos del nivel freático, duración del período inundado y humedad del suelo en el humedal de Marina del Carmolí, que supuso una modificación sustancial de la comunidad de carábidos y tenebriónidos. Por el contrario, las áreas situadas fuera del humedal permanecieron sin cambios reseñables, con un predomino de las especies propias de medios áridos, como *Tentyria laevis*, *Pimelia baetica* y *Zophosis punctata*, todas ellas tenebriónidos.

El índice C/T, basado en la razón entre la densidad de carábidos y la de tenebriónidos, mostró una relación muy estrecha con la humedad edáfica, cuyo aumento se traduce en una reducción de la densidad relativa de tenebriónidos y un aumento de la de carábidos. Este índice constituye un buen bioindicador de las diferencias en la humedad del suelo, lo mismo entre distintos ambientes (áreas situadas dentro y fuera del humedal) que a lo largo del tiempo.

Dentro de la comunidad de carábidos, los cambios han favorecido las especies propias de ambientes más salinos, lo que indica que los cambios hidrológicos han supuesto también un aumento de la salinidad del suelo superficial.

Si en 1984 la comunidad de carábidos estaba dominada por especies xerófilas, como *Dixus sphaerocephalus*, adaptadas a condiciones áridas, en 2003 se componía sobre todo de especies halófilas (tolerantes de la salinidad) y halobiontes (ligadas a la salinidad). Entre estas especies se incluyen *Megacephala euphratica* y *Scarites procerus eurytus,* los carábidos más singulares desde el punto de vista biogeográfico, como buenos ejemplos de la distribución turano-mediterránea (Asia central y el Mediterráneo). Estas dos especies multiplicaron por veinte su abundancia respecto a la de 1984.

Las técnicas estadísticas multivariantes señalaron que los cambios en las comunidades no pueden explicarse a partir de variaciones simples en la humedad o en la salinidad, dado que ambos factores interaccionan para conformar un gradiente complejo. El análisis multivariante indicó la existencia de tres grupos de especies: el primero, asociado a condiciones más esteparias; el segundo, asociado a condiciones más húmedas y con un papel de la salinidad más secundario, y un tercer grupo, caracterizado por especies halobiontes y halófilas, ligado a suelos permanentemente húmedos y salinos, producto de cambios a largo plazo en los niveles freáticos. Además de su tolerancia a la salinidad, la mayoría de las especies de estos últimos grupos muestran características morfológicas propias de hábitat inestables, por lo que presentan una gran capacidad de colonización, en contraste con la comunidad existente en 1984, cuyas especies eran típicas de hábitats más estables y áridos.

El patrón obtenido en las comunidades de escarabajos se observa también en otros componentes ecológicos de la Marina del Carmolí: los hábitats o la comunidad de las aves. Globalmente, señalan una tendencia a la reducción de los rasgos más singulares de los humedales del Mar Menor, ligados a las condiciones áridas. Pero los escarabajos parecen ser más rápidos en responder que otros componentes del ecosistema y nos avisan de los cambios con mayor anticipación y certidumbre. Son unos buenos mensajeros de los cambios del paisaje.

Miguel Angel Esteve, Julia Martínez, M. Francisca Carreño, José Serrano y **Jesús Miñano**
Departamentos de Ecología e Hidrología y de Biología Animal
Universidad de Murcia

Andrés Giménez
Departamento de Biología Aplicada
Universidad Miguel Hernández
(*Elche, Alicante*)

La invisible factoría de carbono en los océanos

Algas microscópicas calcificadoras mantienen las reservas de carbono de la Tierra

La producción de carbonato cálcico (la "calcificación") en los océanos se debe a una variedad de organismos que incluye corales, algas coralinas y organismos planctónicos, y entre éstos foraminíferos, pterópodos y algas fotosintéticas calcificadoras.

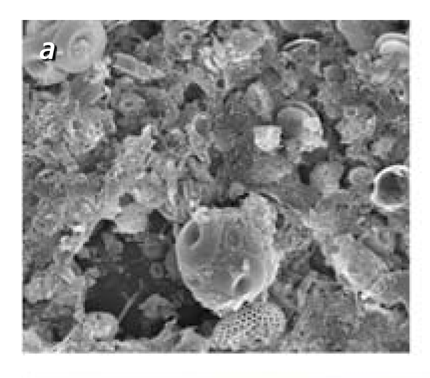
La mayor parte de esa calcificación en los océanos se debe a un grupo de organismos microscópicos fotosintéticos que, en la actualidad, está representado por los cocolitóforos. Estas algas calcificadoras desempeñan una función central en la acumulación de carbonato en el sedimento mediante la producción de cocolitos (placas de carbonato cálcico) y la subsiguiente sedimentación de éstos en los fondos oceánicos.

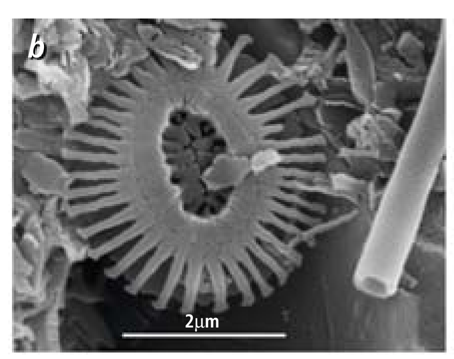
Los cocolitóforos viven en las capas superficiales del océano, donde cumplen dos funciones fundamentales en el control del ciclo de carbono: la fotosíntesis y la calcificación. Mientras que la fotosíntesis (la utilización de energía solar y dióxido de carbono para producir materia orgánica) absorbe carbono, el proceso de la calcificación en cocolitóforos emite carbono: por cada molécula de carbonato cálcico precipitada, se produce dióxido de carbono intracelularmente.

Tales plantas microscópicas presentan así una paradoja. A escala geológica, contribuyen a la acumulación de carbonatos en el sedimento, la mayor reserva de carbono de la Tierra; a escala ecológica, el proceso de la calcificación en cocolitóforos constituye una fuente de dióxido de carbono. Por consiguiente, el balance entre la fotosíntesis y la calcificación determina si estas algas microscópicas actúan como sumideros o como fuentes de carbono, y en qué medida.

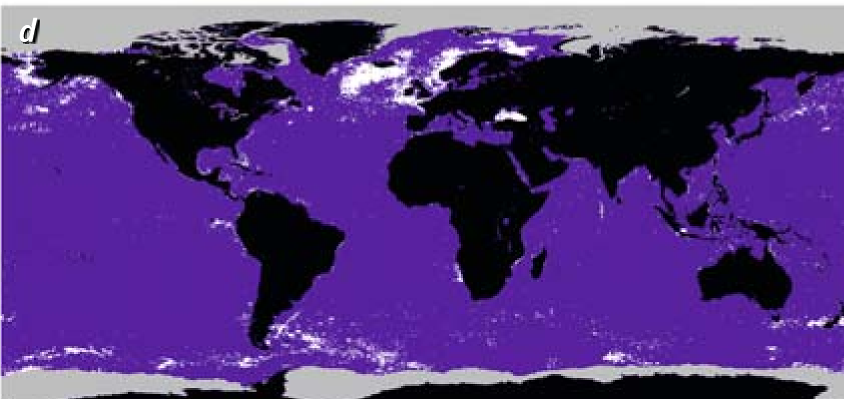
La aparición de este grupo de fitoplancton productor de carbonato cálcico, perteneciente a las algas Haptophytas, se remonta al Triásico tardío (hace alrededor de 200 millones de años). Gracias a la preservación en los depósitos submarinos del biomineral producido por estas algas y a las observaciones por satélite, podemos estudiar su distribución a escalas geológicas y ecológicas. En el océano actual, algunas especies de cocolitóforos forman los *blooms*, o "florescencias", aumentos repentinos en la división celular que incrementan muchísimo la densidad de individuos. Estas florescencias pueden llegar a cubrir cientos de miles de kilómetros cuadrados. Dada la gran escala de estos procesos biológicos y las propiedades fisiológicas de tales organismos, los cocolitóforos han sido durante las últimas décadas el centro de atención en lo referente al ciclo del carbono.

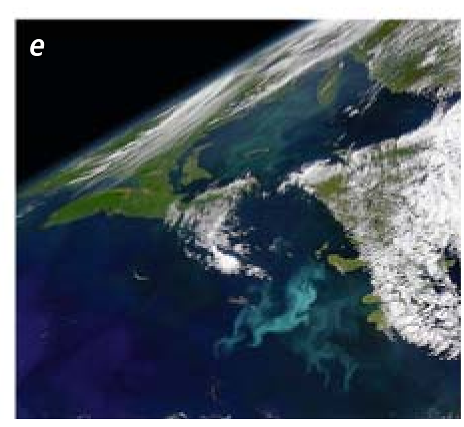
Así, las cuestiones evolutivas sobre el futuro de estos organismos han sido objeto de una serie de estudios de laboratorio centrados en sus respuestas fisiológicas. Al margen de las observaciones en laboratorio y en los océanos, otra poderosa herramienta para descubrir relaciones entre presión ambiental y respuestas biogeoquímicas y para estudiar











Los cocolitóforos se preservan en el registro geológico (*a*, *b*) y en el océano actual (*b*, *c*). Estas algas microscópicas unicelulares producen placas de carbonato cálcico, o cocolitos (*c*), cuya presencia pueden detectar los satélites (*d*, *e*). Las "florescencias" —proliferaciones rápidas— de estos organismos (*d*, *e*) (*representados en blanco en d*) cubren cientos de miles de kilómetros cuadrados.

IGLESIAS RODRIGUEZ ET AL. 2002, *Global Biogeochemical Cycles*, VOL. 16, N.º 1100, PAGS. 47(1)-47(20); PAUL HALLORAN, COMUNICACION PERSONAL (*b*)

la evolución de los cocolitóforos es el registro geológico. Esta lupa para contemplar el pasado ha revelado que los cocolitóforos han sido extraordinariamente versátiles a lo largo de las edades de la Tierra y se han adaptado a la presión ambiental.

Uno de los principales factores ambientales objeto de investigación ha sido el efecto de la acidificación de los océanos en los organismos calcificadores. Una disminución del *p*H en el agua se considera perjudicial para los organismos productores de carbonato cálcico, ya que a medida que el *p*H de los océanos baja, la disolución de carbonato cálcico aumenta. Sin embargo, de las observaciones de muestras de sedimento correspondientes a períodos pasados de acidificación oceánica se desprende que los cocolitóforos no siempre han sufrido alteraciones por estos cambios químicos. Actualmente, se están llevando a cabo experimentos de laboratorio y de campo para determinar los procesos que controlan la fisiología de la calcificación y la fotosíntesis.

Los cocolitóforos han experimentado desde su aparición períodos de evolución. Sin embargo, se sigue todavía sin saber qué ventaja evolutiva y ecológica supone la calcificación y cuáles son los controles ambientales y genéticos de tan importante proceso biogeoquímico. Algunos estudios ven, en la calcificación del fitoplancton, un mecanismo de defensa contra los depredadores, una estrategia para alterar la irradiación solar en las aguas superficiales de los océanos e incluso un mecanismo para elevar el dióxido de carbono intracelular y así mantener tasas elevadas de fotosíntesis.

Por el momento no se ha resuelto el significado del papel ecológico de la biomineralización en los cocolitóforos. Lo que sabemos es que la calcificación no puede ser considerada de forma aislada. La última palabra se obtendrá a través de las observaciones en zonas que estén sufriendo los efectos de la acidificación de los océanos por el aumento de la concentración de dióxido de carbono en ellos. Allí, la evolución en tiempo real nos permitirá averiguar si la versatilidad de estos organismos observada desde su aparición en el registro geológico se perpetuará en el futuro.

M.ª Débora Iglesias-Rodríguez
Centro Nacional de Oceanografía,
Universidad de Southampton (U.K.)

Singularidades desnudas

Afín a un agujero negro es la inquietante singularidad desnuda. Los físicos habían creído —confiado más bien— en que tal tipo de singularidad no podía existir. Ya no están tan seguros

PANKAJ S. JOSHI

CONCEPTOS BASICOS

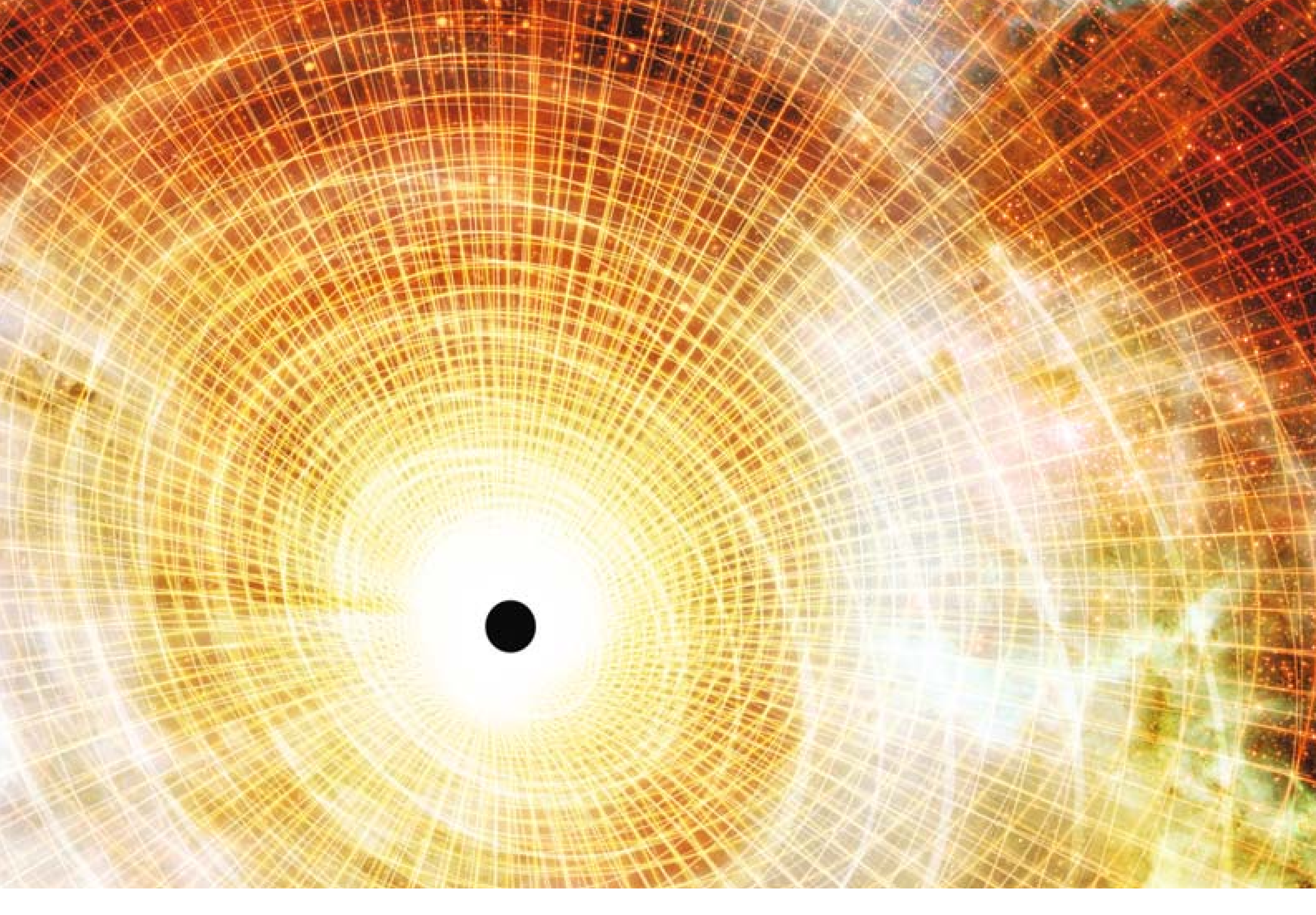
- Se suele creer que el colapso de una estrella de masa muy grande acaba por convertirla en un agujero negro, pero algunos modelos teóricos predicen que pueden transformarse también en una singularidad desnuda. Es uno de los problemas no resueltos de la astrofísica.
- El descubrimiento de las singularidades desnudas cambiaría los derroteros de la teoría unificada de la física, entre otras cosas porque ofrecería una manera de contrastarla mediante observaciones.

La ciencia moderna ha dado al mundo un gran número de ideas curiosas, pero pocas como el final que les depara a las estrellas de mayor masa. Cuando han agotado el combustible que las mantiene durante millones de años, no aguantan su propio peso; se desploman catastróficamente sobre sí mismas. Las estrellas modestas, el Sol entre ellas, aunque se hunden también, se estabilizan llegadas a algún punto de su empequeñecimiento. En una estrella con masa suficiente, la gravedad superará a todas las fuerzas que podrían frenar semejante desplome ("colapso"). El astro se encogerá tanto, que de tener un diámetro de millones de kilómetros pasará a no ser ni el punto de una i.

Físicos y astrónomos piensan que así se crea un agujero negro, una región de espacio de gravedad tan intensa, que nada que entre en ella podrá salir. En las entrañas de esa región hay una singularidad, el punto infinitesimal donde se concentra la masa de la estrella. El perímetro de la región recibe el nombre de horizonte de sucesos. Lo que atraviese el horizonte de sucesos no saldrá nunca, y la luz que emita también quedará atrapada: un observador externo no volverá a verlo jamás. Y todo objeto que traspasa el horizonte acaba inevitablemente en la singularidad.

Pero, ¿sucede realmente así? Las leyes conocidas de la física son claras en cuanto a la formación de la singularidad y algo confusas en cuanto al horizonte de sucesos. La mayoría de los físicos trabaja con la hipótesis de que hay horizonte de sucesos porque les vale de tapadera científica. No se sabe qué pasa en la singularidad: la materia se aplasta, ¿y después? El horizonte de sucesos esconde la singularidad

KENN BROWN *Mondolithic Studios*



y aísla esa laguna en nuestro conocimiento; ya podrían ocurrir en la singularidad procesos de todo tipo, desconocidos para la ciencia, que no afectarían lo más mínimo al mundo exterior. Los astrónomos que estudian las órbitas de los planetas y las estrellas pueden ignorar la incertidumbre relativa a las singularidades y aplicar confiadamente las leyes ordinarias de la física. Pase lo que pase en un agujero negro, de allí no saldrá.

Sin embargo, un creciente grupo de investigadores cuestiona esta hipótesis de trabajo. Se ha descubierto una amplia diversidad de formas de colapso estelar en los que no aparecería un horizonte de sucesos y la singularidad quedaría a la vista, "desnuda". Materia y radiación podrían entrar y salir. La visita a una singularidad dentro de un agujero negro es un viaje sólo de ida; por el contrario, cabría acercarse tanto como se quisiese, al menos en principio, a una singularidad desnuda y regresar para contarlo.

Si las singularidades desnudas existieran de verdad, las implicaciones serían enormes; repercutirían en cada uno de los aspectos de la astrofísica y de la física fundamental. La inexistencia de un horizonte de sucesos significaría que los misteriosos procesos que operasen en la vecindad de las singularidades influirían en el mundo exterior. Las singularidades desnudas explicarían los fenómenos de altas energías observados por los astrónomos y ofrecerían un laboratorio donde se exploraría la naturaleza del espaciotiempo a escalas muy finas.

Censor cósmico

Se pensaba que los horizontes de sucesos eran la parte fácil de los agujeros negros. No cabe duda del carácter misterioso de las singularidades. Allí, la fuerza de la gravedad se hace infinita y no valen las leyes conocidas de la física. De acuerdo con las nociones vigentes sobre la gravedad, las que se encierran en la teoría de la relatividad general de Einstein, es inevitable que aparezcan singularidades cuando se desploma una estrella gigante. Pero la relatividad general no tiene en cuenta los efectos cuánticos, importantes para los objetos microscópicos, que quizás impidan que la fuerza de gravedad se haga de verdad infinita. Hoy se sigue luchando por desarrollar la teoría de la gravedad cuántica necesaria para explicar las singularidades.

En comparación, lo que le ocurre a la región del espaciotiempo alrededor de la singularidad parece más sencillo. Los horizontes de sucesos tienen tamaños de muchos kilómetros; son bastante mayores que la escala típica de los

¿VESTIDAS O DESNUDAS?

Los agujeros negros y las singularidades desnudas son dos resultados posibles del colapso de una estrella agonizante de masa muy grande. En los dos casos hay una singularidad, una concentración de materia tan densa, que se necesitan nuevas leyes físicas para describirla. Cualquier cosa que choque contra la singularidad es destruida.

En un agujero negro, la singularidad está "vestida"; es decir, rodeada por una frontera, el horizonte de sucesos, que la esconde. Nada que entre por esa superficie sale de nuevo.

Una singularidad desnuda carece de frontera. Es visible para los observadores externos, y los objetos que caen hacia la singularidad pueden en principio invertir su curso hasta justo antes del impacto.

fenómenos cuánticos. Suponiendo que no hay intervención de nuevas fuerzas de la naturaleza, los horizontes deberían estar gobernados sólo por la relatividad general, teoría basada en principios conocidos que ha superado noventa años de observaciones.

Dicho esto, hay que reconocer que la aplicación de la relatividad general al colapso estelar sigue siendo una tarea ardua. La resolución de las ecuaciones einsteinianas de la gravedad, notablemente complejas, exige la adopción de simplificaciones. J. Robert Oppenheimer y Hartland S. Snyder, por un lado, y B. Datt, por otro, dieron el primer paso a finales de los años treinta del siglo pasado. Para simplificar las ecuaciones, consideraron sólo estrellas de gas esféricas y de densidad homogénea, y despreciaron la presión gaseosa. Encontraron que, a medida que esta estrella ideal colapsa, la gravedad se intensifica en su superficie hasta tomar tal fuerza que atrapa toda luz y toda materia; es decir, aparece un horizonte de sucesos. La estrella se vuelve invisible para los observadores externos; poco después, colapsa y se convierte en una singularidad.

Las estrellas reales son bastante más complejas. Su densidad es inhomogénea, el gas ejerce presión y adoptan formas diferentes. ¿Se convierte en agujero negro toda estrella de masa suficiente? En 1969, Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, propuso que se aceptase una respuesta afirmativa. Conjeturó que la formación de una singularidad durante el colapso estelar traía consigo necesariamente la formación de un horizonte de sucesos. La naturaleza nos priva de ver una singularidad; el horizonte de sucesos la oculta para siempre. La conjetura de Penrose ha recibido el nombre de hipótesis de la censura cósmica. Se trata sólo de una conjetura, pero en ella se basa hoy el estudio de los agujeros negros. Se tenía la esperanza de poder demostrarla con el mismo rigor matemático con que se probó que las singularidades son inevitables.

Las singularidades al natural

Pero no ha habido tal prueba. En vez de obtener una demostración directa de la censura que se aplique a todas las situaciones, hemos tenido que embarcarnos en una ruta más larga: analizar uno a uno diferentes casos de colapso gravitatorio e ir enriqueciendo poco a poco los modelos teóricos con ingredientes que faltaban en análisis anteriores. En 1973, Hans Jürgen Seifert y sus colaboradores incluyeron la inhomogeneidad. Curiosamente, encontraron que las capas de la materia que colapsa podían intersecarse. Se creaban entonces singularidades momentáneas que no estaban rodeadas de horizontes. Las había de varios tipos, todas un tanto benignas. Aunque la densidad en un punto concreto se hacía infinita, no así la fuerza de la gravedad: la singularidad no concentraba el astro en una punta de alfiler infinitesimal, ni a los objetos entrantes. Por tanto, la relatividad general conservaba su validez y la materia seguía atravesando esos puntos sin encontrar por ello su final.

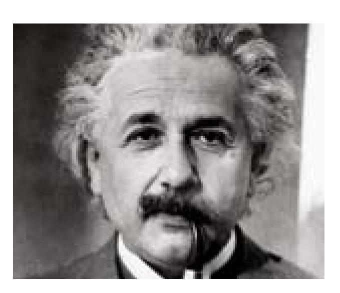
En 1979, Douglas M. Eardley, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Larry Smarr de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, dieron un paso más. Realizaron una simulación numérica de una estrella con un perfil de densidad realista: máxima en el centro y disminuyendo hacia la superficie. Un tratamiento exacto de la misma situación fue llevado a cabo con lápiz y papel en 1984 por Demetrios Christodoulou, del Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zúrich. Ambos métodos deducían que la estrella se encogía hasta un tamaño nulo y aparecía una singularidad desnuda. Pero este modelo aún despreciaba la presión del gas y Richard P. A. C. Newman, entonces en la Universidad de York, probó que su singularidad también era gravitatoriamente débil.

Inspirados por estos descubrimientos, muchos investigadores, yo entre ellos, intentamos demostrar un teorema que estableciese que las singularidades desnudas son siempre débiles. No tuvimos éxito. El motivo quedó claro pronto: las singularidades desnudas no siempre son débiles. Hallamos circunstancias en las que el colapso inhomogéneo conduce a singularidades con gravedad intensa —esto es, singularidades genuinas, capaces de triturar la materia hasta sacarla de las leyes ordinarias de la física— que permanecen visibles para los observadores externos. Un análisis general del colapso estelar sin presión gaseosa, desarrollado en 1993 por Indresh Dwivedi, entonces en la Universidad de Agra, y por mí, aclaró y asentó estos puntos.

A principios de los años noventa se tuvieron en cuenta los efectos de la presión del gas. Amos Ori, del Instituto Technion de Tecnología de Israel, y Tsvi Piran, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, realizaron simulaciones numéricas. Mi grupo resolvió con exactitud las ecuaciones importantes. El colapso de estrellas con una relación perfectamente realista entre la densidad y la presión podía engendrar singularidades desnudas. Casi al mismo tiempo, los equipos dirigidos por Giulio Magli, de la Universidad Politécnica de Milán, y Kenichi Nakao, de la Universidad Metropolitana de Osaka, estudiaron una forma de presión generada por la rotación de las partículas dentro de una estrella que colapsa. También ellos vieron que, en una gran variedad de circunstancias, el desplome da paso a una singularidad desnuda.

LOS PADRES

El debate actual sobre si puede haber singularidades desnudas es parte de una historia más larga, la de la teoría de los agujeros negros.



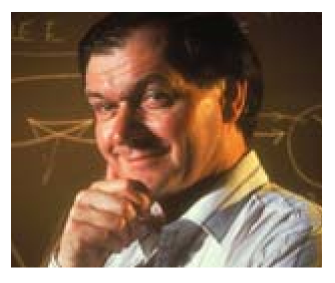
La teoría de la relatividad general predice los agujeros negros, pero Einstein dudaba que pudieran formarse realmente.



J. Robert Oppenheimer (más tarde director del Proyecto Manhattan) y otros probaron que sí podían formarse.



Stephen Hawking y Roger Penrose (*abajo*) demostraron que las singularidades son inevitables.



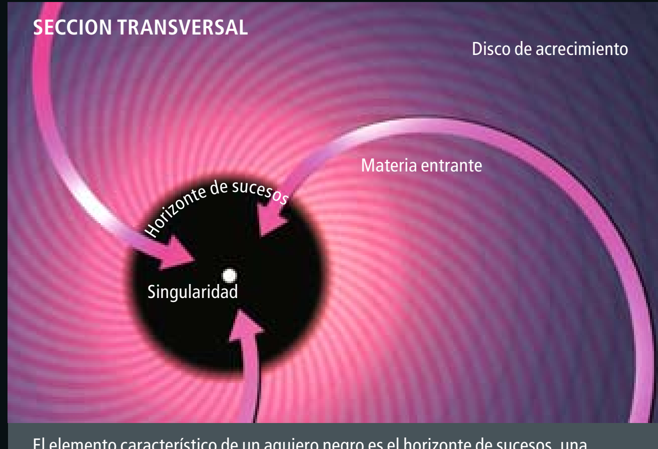
Penrose conjeturó que las singularidades quedan ocultas por horizontes de sucesos. No todos están de acuerdo con este principio.

AIP *Photo Researchers, Inc.* (*Einstein*); BETTMANN *Corbis* (*Oppenheimer*); MATT DUNHAM *Corbis* (*Hawking*); BOB MAHONEY *Getty Images* (*Penrose*)

Dos monstruos cósmicos

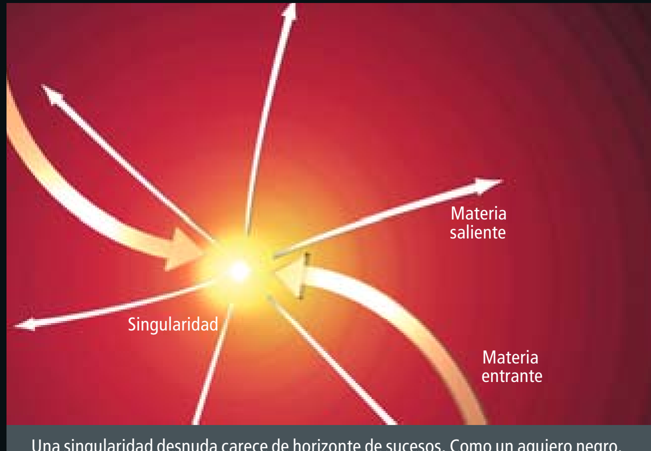
Una singularidad desnuda viene a ser un agujero negro sin la parte a la que éste debe su adjetivo. Puede tanto succionar como escupir materia y radiación. Desde fuera tendría un aspecto y unos efectos en los aledaños diferentes de los característicos de un agujero negro.

AGUJERO NEGRO



El elemento característico de un agujero negro es el horizonte de sucesos, una superficie que la materia puede cruzar hacia su interior, pero no hacia el exterior. Con frecuencia, el horizonte se halla rodeado de un disco de gas en espiral.

SINGULARIDAD DESNUDA



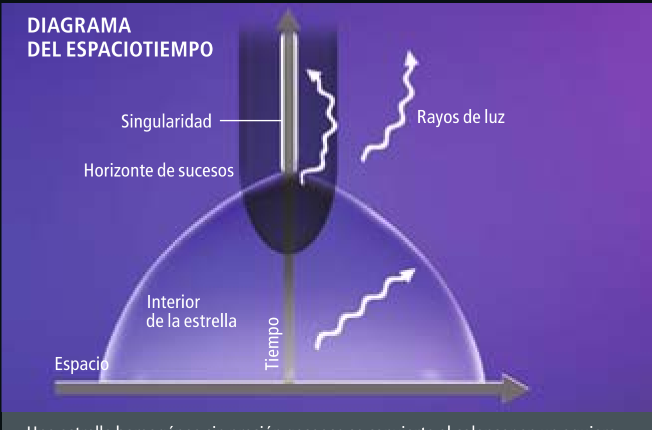
Una singularidad desnuda carece de horizonte de sucesos. Como un agujero negro, succiona materia; al contrario que un agujero negro, también puede escupirla.



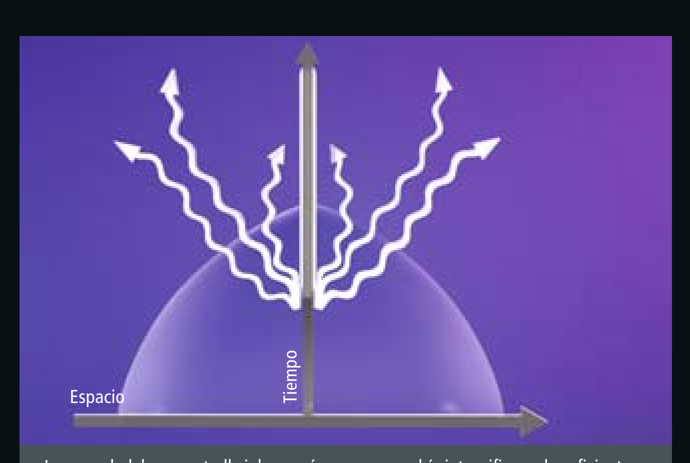
Desde fuera, el agujero negro parece una bola de azabache. La singularidad se encuentra en el interior y no puede ser vista. La fricción en el disco externo genera una intensa radiación. Parte del material del disco escapa en forma de chorro, parte cae al agujero.



Una singularidad desnuda se parece a un diminuto grano de polvo, aunque inimaginablemente denso. Se puede observar la materia entrante hasta su impacto final con la singularidad. La intensa gravedad genera poderosas ondas de choque.



Una estrella homogénea sin presión gaseosa se convierte al colapsar en un agujero negro. La gravedad de la estrella se intensifica y dobla cada vez más la trayectoria de los objetos en movimiento (incluidos los rayos de luz) hasta que los atrapa.



La gravedad de una estrella inhomogénea nunca podría intensificarse lo suficiente para doblar los rayos de luz sobre sí mismos. El colapso la convierte en una singularidad visible (véase el recuadro "Dos formas de condensar una estrella" para las simulaciones paso a paso).

ALFRED T. KAMAJIAN

Dos formas de condensar una estrella

Las simulaciones por ordenador revelan las circunstancias en las que el colapso convierte a una estrella en un agujero negro o en una singularidad desnuda. Las simulaciones mostradas aquí representan la estrella mediante un enjambre de granos cuya gravedad es tan potente, que otras fuerzas de la naturaleza, como la presión del gas, pierden importancia.



1 La estrella es una esfera aplastada.

2 En el colapso, primero se aplana...

3 ...y después se contrae.

4 Con el tiempo, la gravedad se hace tan intensa, que atrapa la luz: se forma el horizonte de sucesos.

5 La materia de dentro del horizonte sigue derrumbándose hasta formar una singularidad.

6 Aunque las fases finales se pueden simular, nunca se las observará debido a la presencia del horizonte.

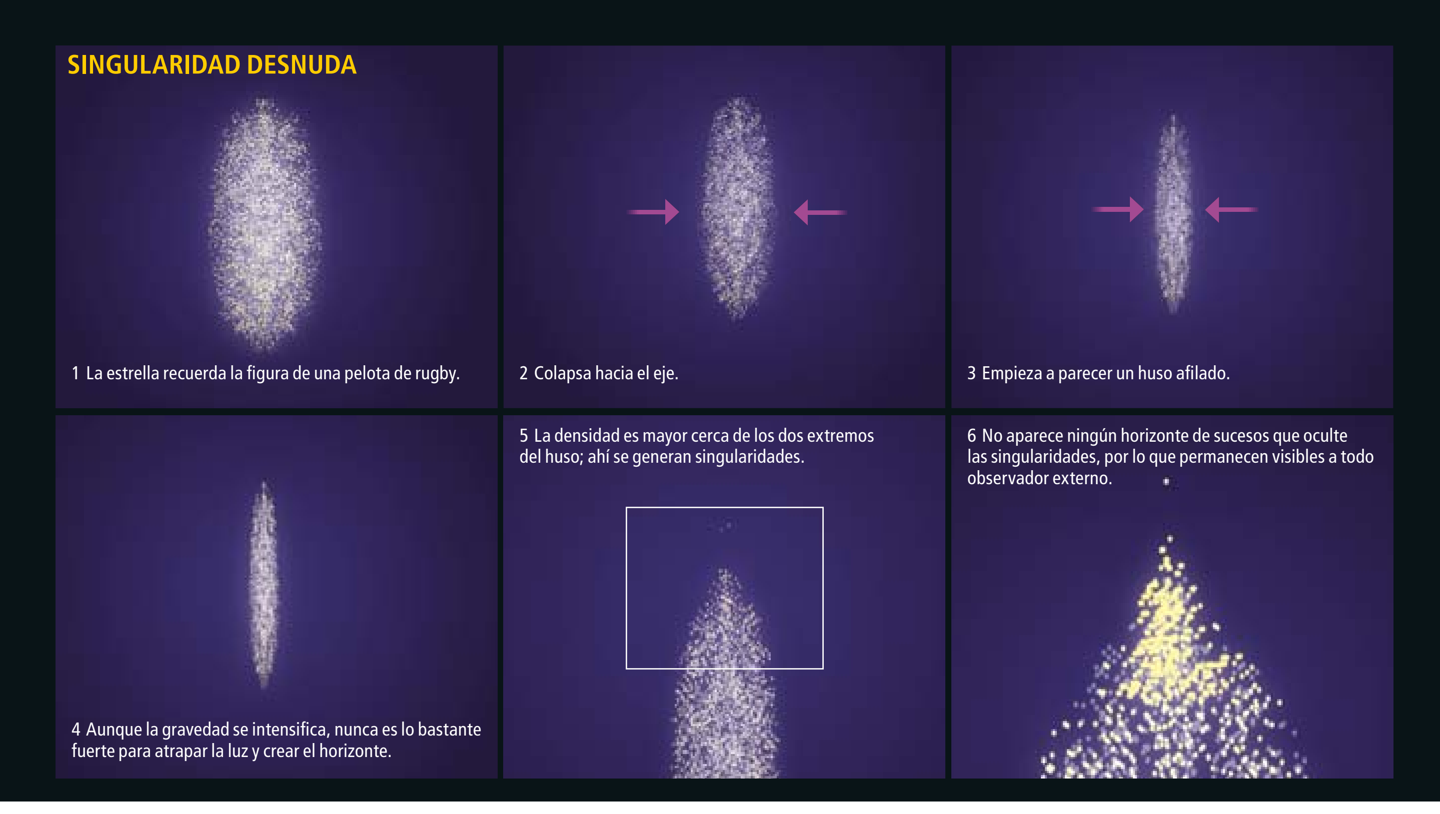
LILA RUBENSTEIN; FUENTE: STUART L. SHAPIRO *Universidad de Illinois* Y SAUL A. TEUKOLSKY *Universidad de Cornell (simulación informática)*

Las investigaciones reseñadas analizaban estrellas perfectamente esféricas, lo que no constituía una limitación tan grande como parece, puesto que la naturaleza de la mayoría de las estrellas se aproxima bastante a dicha forma. Es más, las estrellas esféricas reúnen condiciones más favorables para la creación del horizonte que las estrellas de otras formas; si la censura cósmica falla hasta con las estrellas esféricas, difícil parece que se imponga en las que no lo son. De todos modos, se ha explorado el colapso no esférico. En 1991, Stuart L. Shapiro, de la Universidad de Illinois, y Saul A. Teukolsky, de la Universidad de Cornell, presentaron simulaciones numéricas en las que el colapso de estrellas oblongas podían crear una singularidad desnuda. Pocos años más tarde, Andrzej Królak, de la Academia Polaca de Ciencias, y yo investigamos el colapso no esférico y también encontramos singularidades desnudas. Ambos estudios despreciaban la presión gaseosa.

Los escépticos se han preguntado si tales situaciones no serán artificiosas. ¿No podría un pequeño cambio en la configuración inicial de la estrella llevar a la brusca aparición de un horizonte de sucesos que tape la singularidad? En tal caso, la singularidad desnuda sólo sería un artefacto de las aproximaciones empleadas en los cálculos. No existiría en la naturaleza. Algunas situaciones, con formas inusuales de materia, son, en efecto, muy sensibles. Hasta ahora, nuestros resultados prueban, sin embargo, la estabilidad de la mayoría de las singularidades desnudas frente a pequeñas variaciones de las condiciones iniciales. Por tanto, estas situaciones parecen ser, como dicen los físicos, genéricas; es decir, no son artificiosas.

Cómo combatir al censor

Estos contraejemplos de la conjetura de Penrose sugieren que la censura cósmica no es la regla general. No se puede aseverar que "el colapso de toda estrella masiva sólo crea un agujero negro" o que "cualquier colapso físicamente real termina en agujero negro". Algunas situaciones conducen a un agujero negro y otras a una singularidad desnuda. En algunos modelos, la visibilidad de las singularidades se mantiene sólo por un tiempo; al final aparecen horizontes de sucesos que las ocultan. Otros modelos predicen que las singularidades permanecen visibles para siempre. La singularidad desnuda suele aparecer en el centro geométrico del colapso, pero no siempre, y aun cuando aparezca en el centro, puede extenderse hacia otras regiones. La desnudez tiene también grados: el horizonte de sucesos puede ocultarles la singularidad a los observadores lejanos y dejar que los que atraviesen el horizonte vean la singularidad hasta el momento en que caen en ella. La variedad de los resultados es desconcertante.



Mis colaboradores y yo hemos identificado varias propiedades que una situación ha de tener para que en ella aparezca un horizonte de sucesos. En concreto, hemos evaluado el papel de las inhomogeneidades y de la presión del gas. De acuerdo con la teoría de la gravedad de Einstein, la gravedad es un complejo fenómeno en el que no sólo intervienen las fuerzas de atracción, sino otros efectos, como la cizalladura, en la que distintas capas de materia se desplazan lateralmente en direcciones opuestas. Si la densidad de una estrella que colapsa es muy alta —tanto, que, en principio, debería atrapar la luz— pero inhomogénea, esos otros efectos de la gravedad abrirán rutas de escape. La cizalladura de la materia próxima a la singularidad, por ejemplo, crearía poderosas ondas de choque que expulsarían masa y luz. Tamaño tifón gravitatorio trastocaría la formación del horizonte de sucesos.

Para concretar, consideremos una estrella homogénea y despreciemos la presión gaseosa. (La presión altera los detalles, pero no las líneas generales de lo que sucede.) Cuando la estrella colapsa, la fuerza de la gravedad, que aumenta, dobla cada vez más las trayectorias de los objetos en movimiento. También los rayos de luz se doblan. Llega un momento en el que la atracción es tan intensa, que la luz no puede alejarse de la estrella. La región donde la luz queda atrapada es pequeña al principio, pero crece y con el tiempo alcanza un tamaño estable proporcional a la masa de la estrella. Mientras tanto, puesto que la densidad de la estrella es uniforme en el espacio y sólo varía con el tiempo, la estrella se concentra, toda ella a la vez, en un punto. La luz ya estaba atrapada mucho antes: la singularidad queda escondida.

Ahora consideremos la misma situación, con la única diferencia de que la densidad disminuya cuando la distancia al centro aumente. La estrella en cuestión presenta una estructura de cebolla, con capas concéntricas de materiales. La fuerza de la gravedad que actúa sobre cada capa depende de la densidad promedio de la propia capa. Puesto que las capas interiores, más densas, sufren un mayor empuje gravitatorio, se desploman más deprisa que las exteriores. No toda la estrella cae en una singularidad al mismo tiempo. Las capas más interiores colapsan primero; después se van apilando las capas exteriores.

Este retraso puede postergar la formación del horizonte de sucesos. Si el horizonte se formara en algún lugar, lo haría en las capas interiores más densas. Pero si la densidad disminuye bruscamente con la distancia, esas capas internas no tendrán masa suficiente para atrapar la luz. La singularidad, una vez formada, estará al descubierto. Por tanto, existe un umbral: si el grado de inhomogeneidad

OBSERVACION DE SINGULARIDADES DESNUDAS

Las singularidades desnudas revelarían su presencia de diversas formas:

- Las explosiones de alta energía que producirían se abrillantarían y decaerían de una forma característica.
- Hay ciertos tipos de explosiones de rayos gamma que no tienen explicación; las singularidades desnudas podrían darles una.
- Las singularidades desnudas doblarían los rayos de luz de las estrellas del fondo del cielo de una manera diferente a los agujeros negros.
- Si un agujero negro rotase a una velocidad mayor que cierto valor límite, dependiente de la masa, tendría que tratarse de una singularidad desnuda. El radiotelescopio *Square Kilometer Array*, aún no construido, contará con la precisión necesaria para investigar esta posibilidad.

El autor

Pankaj S. Joshi es profesor de física del Instituto Tata de Investigación Fundamental de Mumbai (antes Bombay). Se ha especializado en gravitación y cosmología.

es muy pequeño, inferior a determinado valor crítico, se generará un agujero negro; con la suficiente inhomogeneidad, aparecerá una singularidad desnuda.

En otros modelos la propiedad relevante corresponde a la velocidad del colapso. Este efecto es muy claro en los modelos donde todo el gas estelar se ha convertido en radiación; se dice de una estrella así que es una "bola de fuego". El primero en analizar tal situación fue P. C. Vaidya, en los años 40 del siglo pasado; se proponía construir modelos de una estrella radiante. De nuevo, existe un umbral: las bolas de fuego de colapso lento se convierten en agujeros negros, pero si colapsan con rapidez suficiente, no se atrapará la luz y la singularidad quedará desnuda.

Sembradora de incertidumbre

Se ha tardado tanto en aceptar las singularidades desnudas por culpa de la cantidad de problemas conceptuales que crean. El motivo de inquietud más común es la incertidumbre que estas singularidades imprimirían en la naturaleza. La relatividad general se invalida en las singularidades y no es capaz de predecir qué efecto tendrían. Como escribió John Earman, de la Universidad de Pittsburgh, de ellas podrían salir lo mismo babas verdes que calcetines perdidos. Lugares mágicos, adonde la ciencia no llega.

Mientras las singularidades permanezcan escudadas por los horizontes de sucesos, la aleatoriedad estará contenida y la relatividad general será una teoría predictiva, al menos fuera del horizonte. Pero si las singularidades estuvieran al descubierto, su comportamiento impredecible podría infectar al resto del universo. Cuando se usase la relatividad general para calcular la órbita de la Tierra alrededor del Sol, digamos, habría que tener en cuenta la posibilidad de que una singularidad emitiese desde cualquier parte del universo un pulso gravitatorio aleatorio y capaz de arrastrar nuestro planeta hasta las profundidades del espacio.

Sin embargo, esta preocupación está fuera de lugar. Lo impredecible es habitual en la relatividad general, y no siempre en lo relacionado con la violación de la censura. La teoría permite el viaje en el tiempo, que crearía bucles con resultados imprevistos. Hasta los agujeros negros resultan impredecibles: si dejásemos caer una carga eléctrica en un agujero negro no cargado, la forma del espaciotiempo alrededor del agujero cambiaría radicalmente y dejaría de ser predecible. O si el agujero negro rota, el espaciotiempo ya no se separará claramente en espacio y tiempo; por consiguiente no se podrá saber cómo evolucionará el agujero negro a partir de un momento dado. Sólo el más puro de los agujeros negros puros, sin carga o rotación alguna, es completamente predecible.

La pérdida de predecibilidad y otros problemas de los agujeros negros nacen de la existencia de las singularidades, se hallen o no escondidas. La solución de estos problemas residirá probablemente en la teoría cuántica de la gravedad, que iría más allá de la relatividad general y ofrecería una explicación completa de las singularidades. En esa teoría, todas las singularidades tendrían una densidad muy alta, aunque finita. Una singularidad desnuda sería una "estrella cuántica", un cuerpo hiperdenso gobernado por las leyes de la gravedad cuántica. Lo que parece aleatorio podría tener una explicación lógica.

Otra posibilidad es que las singularidades presenten de verdad una densidad infinita. La gravedad cuántica no las explicaría: habría que aceptarlas como fuesen. La invalidez de la relatividad general en estos puntos no sería un fallo de la teoría, sino una prueba de que el espacio y el tiempo tienen un límite. La singularidad marcaría el final del mundo físico. Deberíamos considerarla más un suceso que un objeto: el momento en que la materia que colapsa alcanza el final y deja de existir. Como la gran explosión del universo, pero al revés.

En tal caso, preguntarse por lo que dimanaría de una singularidad desnuda carecería de sentido. No habría nada de donde algo pudiese venir: la singularidad es sólo un momento en el tiempo. Desde la distancia no veríamos la singularidad en sí misma, sino los procesos que ocurrirían por las condiciones extremas de la materia cercana al evento; así, ondas de choque causadas por las inhomogeneidades

¿Se puede romper un agujero negro?

Además del colapso de una estrella, hay otra forma de crear una singularidad desnuda: la destrucción de un agujero negro ya existente. Aunque suene a tarea imposible, y peligrosa, las ecuaciones de la relatividad general dicen que el horizonte de sucesos existe sólo si el agujero no rota demasiado deprisa, ni una carga eléctrica desmesurada. La mayoría de los físicos piensan que los agujeros se resistirían a acelerarse o a cargarse más allá de los límites prescritos. Pero algunos creen que los agujeros acabarían por sucumbir, el horizonte se disiparía y la singularidad quedaría expuesta. Acelerar un agujero negro no es muy difícil. La materia cae en él de manera natural con un cierto momento angular que hará que el agujero rote cada vez más rápido, como al empujar una puerta giratoria. Aumentar la carga de un agujero negro es mucho más complicado: un agujero cargado repele las partículas de su misma carga y atrae las de carga contraria, hasta neutralizarse. Pero la entrada de grandes cantidades de materia podría contrarrestar dicha tendencia. La propiedad fundamental de un agujero negro —su capacidad de engullir la materia de sus alrededores para crecer— podría convertirse en la causa de su propia destrucción. Se sigue debatiendo si el agujero negro se salvaría o se desgarraría dejando al descubierto la singularidad de su interior.

de ese medio ultradenso o efectos gravitatorios cuánticos en las inmediaciones.

Además de la impredecibilidad, hay un segundo motivo de inquietud. Tras aceptar provisionalmente la conjetura de la censura, los físicos se han pasado cuarenta años formulando leyes que los agujeros negros deben obedecer. Esas leyes suenan a verdades profundas. No están, sin embargo, exentas de paradojas. Sostienen, por ejemplo, que los agujeros negros absorben y destruyen la información, lo que contradice los principios básicos de la teoría cuántica [*véase* "Los agujeros negros y la paradoja de la información", por Leonard Susskind; Investigación y Ciencia, junio de 1997]. Esta paradoja y otras inconveniencias derivan de la presencia de un horizonte de sucesos. Sin el horizonte, quizás esos problemas desaparecerían. Si la estrella radiara la mayor parte de su masa en los últimos estadios del colapso, no se destruiría ninguna información y no dejaría tras de sí ninguna singularidad. En tal caso, no se necesitaría la teoría cuántica de la gravedad para explicar las singularidades; bastaría la relatividad general.

Las variedades del colapso estelar

Como los seres humanos, las estrellas tienen un ciclo vital. Nacen en nubes gigantescas de polvo y material galáctico en las profundidades del espacio, evolucionan y brillan durante millones de años, para, andando el tiempo, entrar en una fase de disolución y extinción. Las estrellas brillan porque queman su combustible nuclear, al principio sobre todo hidrógeno, al que convierten en helio y después en elementos más pesados. Mantienen un equilibrio entre la fuerza de la gravedad, que empuja la materia hacia el centro, y la presión hacia fuera ejercida por la fusión nuclear. Este equilibrio mantiene estable la estrella, hasta que todo el combustible se ha convertido en hierro, que es, en lo que se refiere a la generación nuclear de energía, inerte. Entonces termina la fusión, la omnipresente fuerza de la gravedad toma las bridas y la estrella se contrae.

Cuando agote su combustible el Sol, el núcleo se le contraerá bajo su propia gravedad hasta un tamaño no mayor que el de la Tierra. Llegado ese punto, lo sostendrá la fuerza ejercida por los electrones en movimiento rápido, que ejercen un tipo de presión llamado "de degeneración electrónica". El objeto resultante será una enana blanca. Las estrellas con una masa entre tres y cinco veces la solar llegan a un estado final distinto, una estrella de neutrones, donde la gravedad es tan intensa, que hasta los átomos ceden. Las estrellas de neutrones, soportadas, no por la presión de los electrones, sino de los neutrones, apenas si miden 10 kilómetros.

Las estrellas de masa aún mayor no terminan ni en una enana blanca, ni en una estrella de neutrones porque ambas formas de presión son en tal caso insuficientes. Al menos que otras formas de presión por ahora desconocidas intervengan en el proceso, el colapso gravitatorio será imparable. La gravedad es la única fuerza operativa; el estado final de la estrella viene determinado por la teoría de la gravedad de Einstein, que predice que el resultado es una singularidad. La duda es si esta singularidad es visible o no.

Un laboratorio de gravedad cuántica

Más que considerar a las singularidades desnudas un problema, cabría ver en ellas un activo. Si las singularidades formadas por el colapso gravitatorio de una estrella masiva fuesen visibles para los observadores externos, podrían servir de laboratorio para estudiar los efectos gravitatorios cuánticos. Las teorías de la gravedad cuántica, al igual que la teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de bucles, están muy necesitadas de observaciones de cualquier tipo, sin las cuales resulta imposible restringir las muchas oportunidades que se ofrecen. Se tiende a buscar las observaciones en el universo temprano, cuando las condiciones eran tan extremas, que los efectos gravitatorios cuánticos dominaban. Pero la gran explosión fue un suceso único. Si las singularidades existieran al descubierto, se observaría algo equivalente a la gran explosión cada vez que la vida de una estrella masiva llegara a su fin.

Para saber si las singularidades desnudas nos dejarían ver fenómenos que de otra forma resultarían inobservables, hemos simulado recientemente un colapso de estrella generador de una singularidad desnuda, incluyendo en la simulación los efectos predichos por la gravedad cuántica de bucles. De acuerdo con esa teoría, el espacio se compone de pequeños átomos que se dejan sentir, cuando la materia es muy densa, por medio de una fuerza repulsiva tan poderosa, que impide que la densidad alcance un valor infinito [*véase* "El rebote del universo", por Martin Bojowald; Investigación y Ciencia, diciembre de 2008]. En nuestro modelo, esta fuerza repulsiva dispersa la estrella y disuelve la singularidad. Casi un cuarto de la masa estelar es expulsada en una fracción del microsegundo final. Un observador lejano vería justo antes una repentina caída de la intensidad de la radiación de la estrella que colapsa (un resultado directo de la gravedad cuántica).

Una explosión así liberaría rayos gamma de alta energía, rayos cósmicos y otras partículas, entre ellas neutrinos. Instrumentos futuros, como el Observatorio Espacial del Universo Extremo —un módulo de la Estación Espacial Internacional—, que debería empezar a funcionar en 2013, podrían tener la sensibilidad suficiente para detectar esa emisión. El detalle de los resultados dependería de las particularidades de las teorías de la gravedad cuántica: las observaciones distinguirían las diversas opciones.

La confirmación o la negación de la censura cósmica supondría una miniexplosión en la física, habida cuenta de que las singularidades desnudas inciden en muchos de los aspectos más profundos de las teorías actuales. Gracias a los trabajos teóricos sabemos ya, fuera de toda duda, que la validez de la hipótesis de la censura no es incondicional, pese a lo que a veces se cree. Las singularidades se visten si se dan las condiciones apropiadas. Aún ha de saberse si tales condiciones ocurren alguna vez en la naturaleza. Si la respuesta fuese afirmativa, los físicos llegarían a amar lo que una vez temieron.

Bibliografía complementaria

BLACK HOLES, NAKED SINGULARITIES AND COSMIC CENSORSHIP. Stuart L. Shapiro y Saul A. Teukolsky en *American Scientist*, vol. 79, n.º 4, págs. 330-343; julio/agosto, 1991.

BLACK HOLES AND TIME WARPS. Kip Thorne. W. W. Norton, 1994.

BANGS, CRUNCHES, WHIMPERS, AND SHRIEKS: SINGULARITIES AND ACAUSALITIES IN RELATIVISTIC SPACETIMES. John Earman; Oxford University Press, 1995.

QUANTUM EVAPORATION OF A NAKED SINGULARITY. Rituparno Goswami, Pankaj S. Joshi y Parampreet Singh en *Physical Review Letters*, vol. 96, n.º 3, artículo 031302; 27 de enero, 2006.

GRAVITATIONAL COLLAPSE AND SPACE-TIME SINGULARITIES. Pankaj S. Joshi. Cambridge University Press, 2007.

Nanomedicina contra el CANCER

Si asociamos el organismo humano a un sistema de redes moleculares, los médicos podrían, llegado el caso, abordar los puntos conflictivos con técnicas nanométricas, hablemos del cáncer o de otras patologías

James R. Heath, Mark E. Davis y Leroy Hood

CONCEPTOS BASICOS

- El enfoque sistémico de la medicina asocia el cuerpo a una compleja red de interacciones moleculares que pueden medirse y modelarse para desentrañar las causas de enfermedades como el cáncer.
- La medicina sistémica utiliza instrumentos miniaturizados hasta el extremo; con un gasto mínimo, miden y manipulan moléculas.
- Las terapias de escala nanométrica aplican tratamientos dirigidos con precisión a tumores, al tiempo que evitan incidir en tejidos sanos.

Antes de una sesión en el gimnasio o de tomar un pastel en una fiesta, los diabéticos pueden utilizar un medidor portátil de glucosa en sangre y ajustar su alimentación o la dosis de insulina para prevenir repentinas subidas o bajadas de azúcar. Estos económicos instrumentos permiten controlar la glucemia a lo largo del día mediante un simple pinchazo en el dedo. Al que no sea diabético le parecerá enojoso, pero no ha conocido situaciones anteriores, cuando la diabetes entrañaba una seria amenaza y era mucho más ingobernable.

La calidad de vida hoy accesible a los diabéticos mediante técnicas sencillas y nada costosas que extraen información del propio organismo deja entrever todo lo que podría llegar a ofrecer la medicina: mayor capacidad de predicción y prevención, mayor ajuste a las necesidades individuales y mayor participación del paciente en el cuidado de su propia salud. De hecho, creemos que se avanza ya en esa dirección; en gran parte merced a técnicas nuevas que permiten adquirir y analizar con prontitud y poco gasto informaciones biológicas.

Una de las claves de semejante evolución médica reside en la extrema miniaturización alcanzada en las mediciones diagnósticas: basta una minúscula gota de sangre o células extraídas de tejidos patológicos.

Los nuevos instrumentos, construidos a escalas micrométricas y nanométricas, permiten manipular y medir moléculas en gran número con prontitud, precisión y, en último término, a costes insignificantes. Esta combinación de calidad y precio abre nuevos derroteros para el estudio y el tratamiento de enfermedades: el cuerpo humano puede ya contemplarse como un sistema dinámico de interacciones moleculares. Las mediciones sistémicas obtenidas de este modo se integran luego en modelos computacionales, que señalan la detección precoz de una anomalía. La combinación de estas observaciones con nuevas terapias apoyadas en la nanotecnia permitirá dirigir el tratamiento exclusivamente hacia esa alteración, evitándose graves efectos secundarios.

Aunque toda la medicina termine algún día por acatar esos principios, la investigación oncológica actual ofrece ya ejemplos de obtención, por técnicas miniaturizadas, de los datos que configuran una amplia visión sistémica de la enfermedad.

1. **NANOPARTICULAS fabricadas para transportar una carga terapéutica. Se guarnecen con proteínas que operan a modo de llaves de acceso a las células tumorales.**

Medicina sistémica

La elaboración de un modelo sistémico exige cantidades ingentes de datos. La abundante información que contienen los organismos puede considerarse digital, pues podemos medirla, cuantificarla y programarla en un modelo. Tal información biológica comienza en el código genético. Cada célula del cuerpo humano transporta una copia íntegra del genoma, constituido por tres mil millones de pares de bases de ADN, verdaderas "letras" del alfabeto genético. En ellas se codifican unos 25.000 genes, que encierran instrucciones de actuación sobre células y tejidos. En el interior de cada célula, los genes se transcriben a secuencias de ARN mensajero que transportan las instrucciones hasta un equipo celular, que lee el ARN y fabrica cadenas de aminoácidos conforme a las instrucciones dictadas. A su vez, esas cadenas de aminoácidos se repliegan y forman proteínas: las máquinas moleculares tridimensionales que ejecutan la mayoría de las funciones vitales.

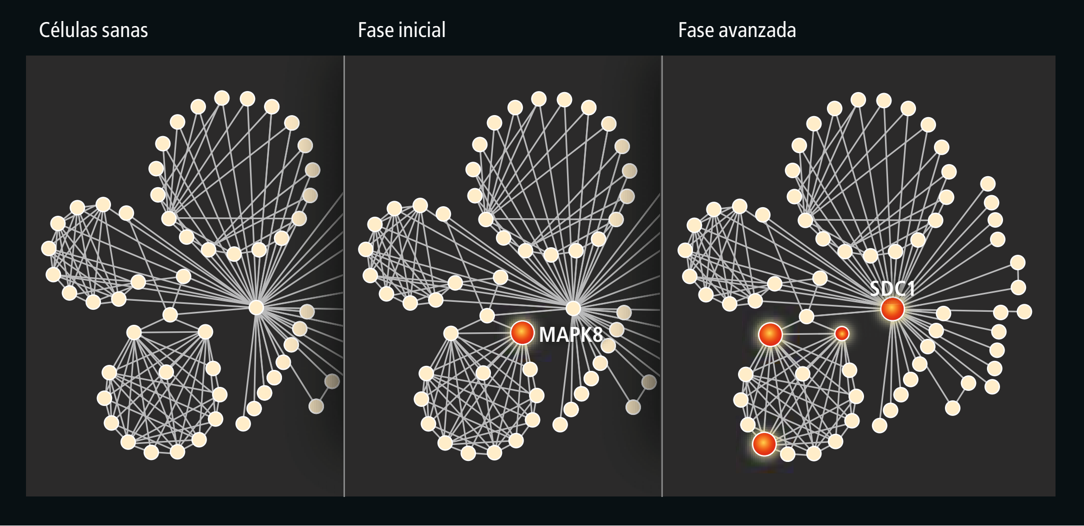
En un sistema biológico, como lo es una persona, todos esos "datos" se transmiten, procesan, integran y, por fin, se ejecutan a través de redes de proteínas que interaccionan, entre sí y con otras moléculas de relevancia biológica, en el interior de las células.

Si concebimos el sistema entero como una red de eventos interrelacionados, la enfermedad puede considerarse consecuencia de algún factor que perturba los patrones de información programados de la red. La causa inicial sería un fallo del sistema: un cambio aleatorio en el ADN, que alteraría una instrucción codificada, o una influencia del medio exterior, como la radiación ultravioleta de la luz solar, que daña el ADN con resultado, en ocasiones, de melanoma. Así como una perturbación inicial produce un efecto ondulatorio y reflejos sucesivos, los patrones de información siguen cambiando; esas alteraciones dinámicas explican la naturaleza de la enfermedad en términos mecánicos.

Por supuesto, la construcción de un modelo computacional preciso de una red biológica de esta índole supone una labor imponente. Exige la informatización de millones de mediciones de niveles de ARN mensajero y de proteínas, para capturar la dinámica de la transición sistémica de salud a enfermedad. No obstante, un modelo exacto (que predijera los efectos de las perturbaciones) serviría de base



2. LAS CELULAS DE LA PROSTATA contienen grupos de proteínas (*círculos*) que interaccionan unos con otros (*líneas*) en pequeñas redes; los cambios celulares de ciertas proteínas van asociados a una transición de salud a enfermedad. En la fase inicial de un cáncer de próstata, las células presentan un aumento de los niveles de MAPK8, proteína que regula el movimiento celular. En fases más avanzadas, los niveles de SDC1 en células cancerosas son 16 veces mayores que en las células de la fase inicial. Esos cambios de concentración ofrecen pistas diagnósticas sobre la presencia y el curso de la enfermedad.



para modificar radicalmente la comprensión de los estados sanos y patológicos, así como el tratamiento médico oportuno.

Durante los últimos decenios, el cáncer ha sido la patología estudiada con mayor intensidad. A pesar de ello, los tumores se han identificado por características harto someras: tamaño, localización en determinados órganos o tejidos, y posible dispersión de células malignas desde el tumor primario. Según estas "etapas" diagnósticas, cuanto más avanzado esté el cáncer, más desolador será el pronóstico para el paciente. Una hipótesis que incurre en múltiples contradicciones. A menudo responden de muy distinto modo pacientes a los que se han diagnosticado cánceres idénticos y que han recibido tratamientos similares dentro del repertorio normal de radiaciones y quimioterapias (unos se recuperan del todo, mientras que otros sucumben al poco tiempo).

Las mediciones a gran escala de las concentraciones de ARN mensajero y proteínas en los tumores sometidos a biopsia han revelado la insuficiencia de la postura tradicional: los cánceres, en apariencia idénticos, de dos pacientes contienen redes perturbadas de muy diferente manera. Gracias al análisis molecular, numerosos cánceres que una vez se consideraron una misma afección se tratan hoy como enfermedades distintas.

Cerca del 80 por ciento de los tumores de próstata humanos crece con tal lentitud, que ni siquiera llega a molestar a sus portadores. El 20 por ciento restante se desarrolla con mayor celeridad, invade tejidos circundantes e incluso se extiende (por metástasis) a órganos distantes y finalmente provoca la muerte. Nuestro equipo investigador trata ahora de identificar las redes patológicamente alteradas en las células de la próstata que caracterizan esos dos principales tipos de cáncer, de manera que un médico pueda identificar desde el principio la clase de cáncer que sufre el paciente. Con tal información se evitarían, por innecesarios, el 80 por ciento de los tratamientos quirúrgicos, de irradiaciones o quimioterapias, amén de los dolores, incontinencia e impotencia que los acompañan.

Al propio tiempo examinamos las redes interiores de la próstata que distinguen, dentro de ese 20 por ciento de casos más agresivos, subtipos que quizá requerirían tratamientos distintos. Al analizar las redes características de cánceres de próstata en fase temprana y metastáticos, hemos encontrado una proteína secretada en la sangre que resulta ser un excelente marcador para la identificación del cáncer metastático. Indicadores de este tipo, que clasifiquen en subtipos una enfermedad como el cáncer de próstata, facilitarán la elección de la terapia apropiada para cada individuo.

Detección de la enfermedad

Si bien el análisis de ARN mensajeros y proteínas de los tejidos tumorales informa sobre la naturaleza de un cáncer ya diagnosticado, un enfoque sistémico puede asimismo aplicarse para distinguir entre salud y enfermedad. La sangre irriga todos los órganos del cuerpo; transporta proteínas y otras moléculas. Ofrece, por tanto, un mirador excelente sobre el organismo entero. La capacidad de detectar un desequilibrio en ciertas proteínas o ARN mensajeros serviría entonces para señalar la presencia de una enfermedad y precisar su localización y naturaleza.

Nuestro equipo ha encarado el reto de utilizar la sangre para evaluar el estado del sistema orgánico entero. Para ello, comparamos las poblaciones de ARN mensajero producidas en unos 50 órganos. Encontramos que cada órgano humano contiene por lo menos 50 tipos de ARN mensajero que se elaboran primariamente en ese órgano. Ciertos de esos ARN codifican proteínas específicas del órgano que son secretadas en el torrente san-

Los autores

James R. Heath, director del Centro NanoSystems de Biología del Cáncer, enseña química en el Instituto de Tecnología de California, donde trabaja en materiales nanoestructurados y circuitos nanoelectrónicos, así como en técnicas de diagnosis y tratamiento del cáncer. **Mark E. Davis**, profesor de ingeniería química en el mismo centro, desarrolla materiales especiales para terapias experimentales. **Leroy Hood** preside el Instituto de Biología de Sistemas en Seattle, que él mismo fundó tras haber explorado las técnicas de secuenciación de ADN y proteínas y creado numerosas empresas de biotecnología.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: LEROY HOOD

guíneo; el nivel de cada una de ellas reflejará el funcionamiento de las redes que controlan su producción dentro del órgano. Cuando esas redes sufran una perturbación patológica, se alterará la concentración de las proteínas correspondientes. Tales cambios permitirían identificar la enfermedad, ya que cada patología del órgano perturbará redes biológicas distintas de maneras singulares.

Si se evaluaran los niveles de unas 25 proteínas procedentes de cada una de esas huellas identificadoras del órgano, el análisis computacional debería detectar todas las patologías mediante la determinación de las redes que estén perturbadas: bastaría con un análisis de sangre. Más allá de una detección precoz —tan importante en el cáncer—, este enfoque ofrecería medios para clasificar en subtipos la enfermedad de un paciente, seguir su progreso y observar su respuesta a la terapia. Para confirmar esta hipótesis hemos seguido la evolución de la encefalopatía espongiforme (de origen priónico) en ratones.

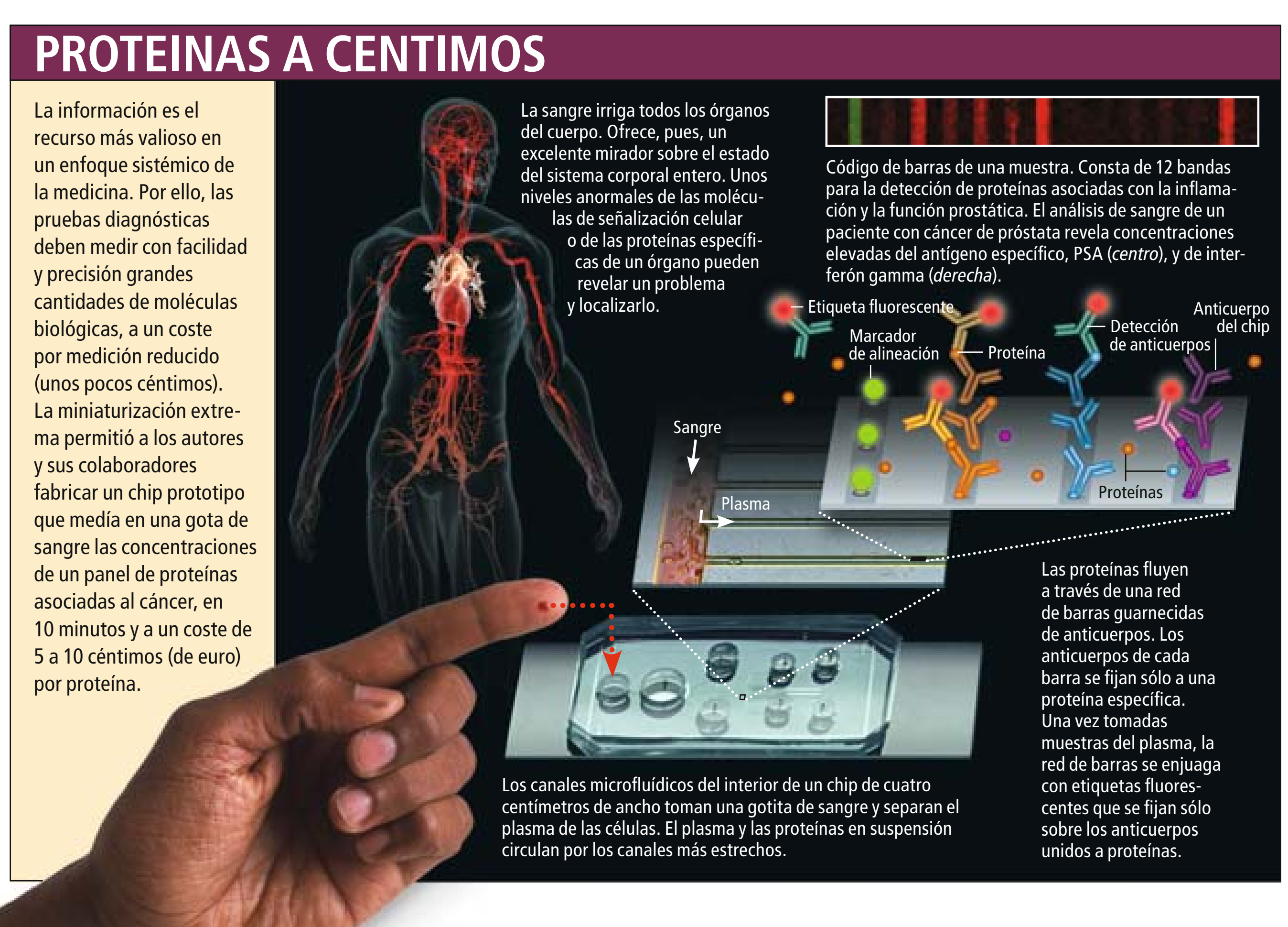
Inyectamos a los roedores proteínas con priones infecciosos que provocaban una patología cerebral degenerativa afín a la "enfermedad de las vacas locas". Analizamos luego la población total de ARN mensajeros en el cerebro de los animales infectados y en el grupo control, en 10 momentos durante la aparición de la enfermedad. A partir de esos datos, identificamos los 300 ARN mensajeros cambiantes que codificaban la respuesta esencial a la enfermedad priónica. Unos 200 de ellos pertenecían a cuatro redes biológicas que explicaban casi todos los aspectos conocidos de la enfermedad; el centenar restante describía otros hasta entonces ignorados.

Además, el estudio de esas redes perturbadas por la encefalopatía nos permitió identificar en la sangre cuatro proteínas que predecían la presencia de la enfermedad priónica antes de la aparición de los síntomas. Esas proteínas podrían, por tanto, utilizarse a modo de marcadores diagnósticos presintomáticos, una poderosa ventaja para la medicina preventiva.

Para todo ello hubo que realizar alrededor de 30 millones de mediciones y desarrollar una serie de programas informáticos que analizaran, integraran y modelaran tamaño aluvión de datos. La construcción de modelos de redes que predigan la enfermedad y la traducción de estos modelos a instrumentos de utilidad médica exigirán métodos rápidos, sensibles y, sobre todo, económicos para la secuenciación de ADN y la medida de concentraciones de ARN mensajeros y proteínas.

PROTEINAS A CENTIMOS

La información es el recurso más valioso en un enfoque sistémico de la medicina. Por ello, las pruebas diagnósticas deben medir con facilidad y precisión grandes cantidades de moléculas biológicas, a un coste por medición reducido (unos pocos céntimos). La miniaturización extrema permitió a los autores y sus colaboradores fabricar un chip prototipo que medía en una gota de sangre las concentraciones de un panel de proteínas asociadas al cáncer, en 10 minutos y a un coste de 5 a 10 céntimos (de euro) por proteína.



La sangre irriga todos los órganos del cuerpo. Ofrece, pues, un excelente mirador sobre el estado del sistema corporal entero. Unos niveles anormales de las moléculas de señalización celular o de las proteínas específicas de un órgano pueden revelar un problema y localizarlo.

Código de barras de una muestra. Consta de 12 bandas para la detección de proteínas asociadas con la inflamación y la función prostática. El análisis de sangre de un paciente con cáncer de próstata revela concentraciones elevadas del antígeno específico, PSA (*centro*), y de interferón gamma (*derecha*).

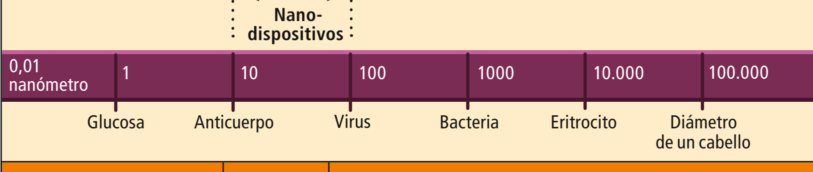
Las proteínas fluyen a través de una red de barras guarnecidas de anticuerpos. Los anticuerpos de cada barra se fijan sólo a una proteína específica. Una vez tomadas muestras del plasma, la red de barras se enjuaga con etiquetas fluorescentes que se fijan sólo sobre los anticuerpos unidos a proteínas.

Los canales microfluídicos del interior de un chip de cuatro centímetros de ancho toman una gotita de sangre y separan el plasma de las células. El plasma y las proteínas en suspensión circulan por los canales más estrechos.

DORLING KINDERSLEY (*mano*); BRYAN CHRISTIE DESIGN (*hombre transparente*); CORTESIA DEL GRUPO DE HEATH (*chip, detalle del chip y código de barras*); JEN CHRISTIANSEN (*diagrama de anticuerpos*)

LA NANOTECNIA EN MEDICINA

A escala nanométrica (un nanómetro corresponde a la milmillonésima parte de un metro) los materiales y dispositivos interactúan con células y biomoléculas de maneras singulares. En investigación y terapéutica se utilizan técnicas de entre 10 nanómetros (tamaño de un anticuerpo) y 100 nanómetros (tamaño de un virus). Estos dispositivos y partículas se aplican a la detección de proteínas y ADN, a la mejora de imágenes y a la administración de agentes terapéuticos dirigida a tejidos específicos.



NANOTECNOLOGIA	USO	FUNCIONAMIENTO
NANOHILOS (Proteína; Anticuerpo; Señal)	Sensor	Un hilo conductor, de entre 10 y 20 nanómetros de grosor, se tiende a través de un canal por el que pasa la muestra. Para detectar proteínas o ADN, se unen a cada cable sondas formadas por anticuerpos o ADN complementarios. Cuando una proteína encuentra el anticuerpo que le corresponde, se adhiere a la sonda y cambia las propiedades conductoras del hilo, lo que permite la detección electrónica del evento.
VOLADIZOS (ADN sonda; ADN muestra)	Sensor	También es posible unir sondas moleculares, tales como el ADN de una hebra, a vigas de unos pocos nanómetros de diámetro. Cuando se las expone a una muestra de ADN, las hebras complementarias se adhieren a las sondas por encima del voladizo, haciendo que las vigas se curven ligeramente. Esta respuesta se detecta visualmente o mediante un cambio en la conductividad eléctrica de las vigas.
PUNTOS CUANTICOS (Tumor descubierto)	Formación de imágenes	Los nanocristales formados por elementos inorgánicos, como cadmio o mercurio, encapsulados en látex o metal responden a la luz mediante la emisión de fluorescencia en distintas longitudes de onda e intensidades que dependen de su composición. Los anticuerpos unidos a los cristales hacen que los puntos se adhieran a un tejido seleccionado (un tumor, por ejemplo), que entonces será más fácilmente visible con las técnicas actuales de formación de imágenes.
NANOESFERAS (Oro; Sílice)	Apuntar a tejidos Formación de imágenes	Las nanoesferas macizas de sílice, a veces encapsuladas en una delgada lámina de oro, circulan por el torrente sanguíneo sin penetrar en la mayoría de los tejidos sanos, pero con tendencia a acumularse en tejidos tumorales. A estas esferas se unen moléculas terapéuticas; al acumularse en el tumor un gran número de nanoesferas, éstas absorben el calor que recibe el tumor y destruyen el tejido. Dependiendo de su composición, las nanoesferas absorben o dispersan la luz, resaltando las imágenes tumorales obtenidas por ciertos tipos de espectroscopía.
NANOPARTICULAS (Caparazón lipídico; Núcleo terapéutico; Proteína transferrín)	Apuntar a tejidos Administración	Pueden fabricarse partículas formadas por materiales diversos que contengan en su núcleo moléculas terapéuticas para ser liberadas en el momento y lugar oportunos. Esos vehículos de administración corresponden a sencillos caparazones lipídicos que se filtran por las paredes de los vasos sanguíneos tumorales y desprenden luego en el tejido afectado, lentamente, un fármaco quimioterapéutico. Las nanopartículas recientes tienen un diseño más complejo: contienen elementos exteriores (anticuerpos) que apuntan a proteínas específicas del tumor y materiales que minimizan la interacción con los tejidos sanos.

Medición molecular

Los avances en la técnica de secuenciación del ADN pueden equipararse a los de la famosa Ley de Moore en microprocesadores: durante los últimos decenios se ha duplicado cada 18 meses el número de elementos funcionales susceptibles de integrarse en un chip por unidad de coste. De hecho, las máquinas de secuenciación de ADN de la próxima generación están aumentando la velocidad de lectura de ADN a un ritmo muy superior al de la Ley de Moore. El primer genoma humano secuenciado tardó entre tres y cuatro años en realizarse; su coste rondó los 300 millones de dólares. Creemos que dentro de cinco a 10 años esta operación no costará más de 1000 dólares (300.000 veces menos) y podrá realizarse en un día. En el próximo decenio, habrá adelantos similares en otras técnicas biomédicas que facilitarán el despliegue de una medicina predictiva y personalizada.

En este momento, la medición de niveles en sangre de una proteína diagnóstica de cáncer, como el antígeno específico de próstata (PSA), cuesta en un hospital alrededor de 40 euros. Dado que en medicina sistémica se requiere un gran número de mediciones, debe reducirse sobremanera el coste de las mismas. También tiene valor el tiempo invertido: una analítica podría durar de horas a días, en parte por las numerosas etapas necesarias para separar los componentes (células, plasma, proteínas y otras moléculas) antes de aplicarles métodos analíticos de distinta precisión.

En comparación con las técnicas actuales, la miniaturización extrema permite mediciones de mayor celeridad y precisión. A escala micrométrica y nanométrica, existen ya valiosas técnicas que permiten a los investigadores recopilar los datos que configuran una visión sistémica de la información biológica. En cuanto a su aplicación a la atención sanitaria, sin embargo, el enfoque sistémico exige que cada medición de una proteína cueste sólo unos pocos céntimos, objetivo que probablemente no alcancen muchas de las nacientes técnicas nanométricas.

Dos de los autores (Heath y Hood) han desarrollado un chip de cuatro centímetros de ancho que analiza en una gota de sangre los niveles de proteína. Utiliza para ello una versión miniaturizada de las reglas habituales de detección proteínica. El chip se compone sólo de vidrio, plástico y reactivos, por lo que su coste de producción es bajo. El dispositivo recoge unos dos microlitros de sangre, separa las células del plasma y después mide un panel de doce proteínas plasmáticas, todo ello en unos pocos minutos. Se prevé que el uso de este prototipo cueste de 4 a 8 céntimos de

JEN CHRISTIANSEN (*diagramas*); CORTESIA DE ANDREW SMITH Y SHUNING NIE *Universidad Emory* (*ratón*)

euro por proteína analizada, pero al final de su desarrollo debería alcanzarse el coste que requiere la medicina sistémica.

Llevará tiempo conseguir que el chip analice cientos de miles de proteínas, pero los progresos en el diseño de microfluidos, química de superficies y técnicas de medición salvan con prontitud la brecha existente entre las posibilidades actuales y las que exige la plena implantación de una nueva medicina, predictiva y personalizada. Nuestros colaboradores del Caltech, Stephen R. Quake y Axel Scherer, han desarrollado un sistema de microfluidos que integra en un chip válvulas y bombas. Esta "fontanería" miniaturizada dirige con precisión los reactivos químicos, las biomoléculas y las muestras biológicas a cada una de las numerosas cámaras del chip: cada cámara representa una medición separada e independiente. El "chip laboratorio" se transforma en "chip multilaboratorio", ofreciendo medios para reducir aún más el coste de las mediciones biológicas.

Las técnicas miniaturizadas desempeñarían asimismo una función importante en las terapias y la prevención. La comprensión de las redes biológicas afectadas ofrecería en última instancia nuevas dianas a terapias avanzadas que restablecieran la dinámica de la red. A más corto plazo, el enfoque sistémico mejora la administración de los fármacos existentes, ya que determina la combinación farmacológica óptima para cada paciente. Asimismo, la nanotecnia reduce en gran medida la dosis requerida de cada fármaco para tratar un cáncer.

Dianas minúsculas

Las nanopartículas terapéuticas son pequeñas ante la mayoría de las cosas, pero voluminosas si se comparan con una molécula. Trabajar a escala nanométrica ofrece, pues, un grado de control inusitado sobre el comportamiento de las partículas terapéuticas en el interior del cuerpo. Las nanopartículas, de tamaños entre uno y 100 nanómetros, se forman por agregación de diversos agentes terapéuticos ya existentes, como los fármacos aplicados en quimioterapia o las hebras de ARN de silenciamiento génico (ARNsi).

Esa carga útil vendría encapsulada en materiales sintéticos, como polímeros o moléculas de tipo lípido; se lograría hacer diana en una proteína celular específica mediante la incorporación a la superficie de la nanopartícula de anticuerpos y otras moléculas diseñadas para adherirse a proteínas de ese género. La modularidad confiere a la nanoterapéutica una singular versatilidad y la capacidad de ejecutar funciones complejas en el interior del paciente, en el lugar y momento adecuados.

Uno de los mayores retos en el desarrollo y uso de anticancerígenos consiste en hacerlos llegar a los tejidos afectados sin que intoxiquen todo el organismo. Incluso las nanoterapias sencillas tienen, por el mero tamaño de las partículas, propiedades especiales que determinan su movimiento hacia los tumores y a través de los mismos. Las nanopartículas menores de 10 nanómetros, así como los fármacos de molécula pequeña, se eliminan rápidamente por el riñón; las mayores de 100 nanómetros, en cambio, se mueven con dificultad por el tumor. Las partículas de 10 a 100 nanómetros se desplazan por el torrente sanguíneo en busca de los tumores, aunque no pueden escapar hacia la mayoría de los tejidos sanos a través de las paredes de los vasos. Dado que los tumores tienen vasos sanguíneos anormales con paredes acribilladas de grandes poros, las nanopartículas se filtran al tejido maligno circundante. De ahí que las nanopartículas tiendan a acumularse en los tumores y ejerzan un impacto mínimo en otras partes del cuerpo: se evita así la acción devastadora de los fármacos anticancerígenos.

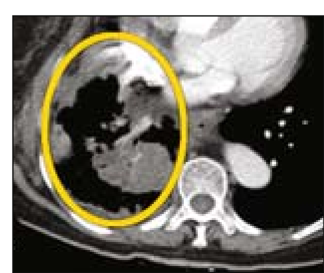
Aun cuando un fármaco normal lograra penetrar en células tumorales, las proteínas de bombeo celular lo expulsarían antes de que pudiera actuar (un mecanismo común de resistencia a los fármacos). Las nanopartículas penetran en la célula por endocitosis, proceso natural que forma una bolsa con la membrana celular en torno a un objeto extraño para introducirlo dentro de la célula y, de ese modo, proteger la carga útil de la partícula frente a la acción de las bombas celulares.

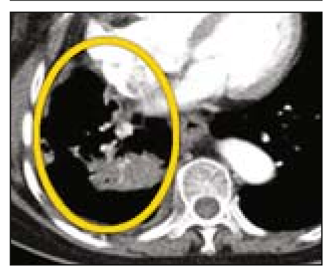
Ciertos anticancerígenos hoy reclasificados como nanopartículas existen desde hace algún tiempo. Ilustran algunas de esas ventajas esenciales que ofrecen las nanopartículas al llegar a las células tumorales con mínima repercusión en los tejidos sanos. La doxorrubicina liposomal, un fármaco de quimioterapia estándar encapsulado en un armazón lipídico, se ha aplicado al tratamiento del cáncer de ovarios y el mieloma múltiple. Esta versión encapsulada resulta menos tóxica para el corazón que la doxorrubicina sola, aunque se ha observado un nuevo efecto secundario, la toxicidad en la piel.

Otras nanopartículas, de síntesis más reciente, tienen diseños más complejos que proporcionan funciones múltiples. La partícula de 30 nanómetros IT-101, por ejemplo, acreditada ya su seguridad en los ensayos de fase I, consiste en un agregado de polímeros unidos al camptothecin, fármaco de molécula pequeña estrechamente emparentado con

EN EL BLANCO

Un nanoterapéutico experimental, el IT-101, encapsula un fármaco de quimioterapia, el camptothecin, en el interior de una nanopartícula ideada para circular en el torrente sanguíneo durante un período largo y acumularse en los tumores. En un ensayo de seguridad en humanos, se comprobó la eficacia del tratamiento en pacientes con cánceres avanzados. En la exploración por TAC de la zona central de un paciente, se observa un tumor de pulmón extendido (*arriba, masa gris rodeada*) antes del tratamiento con IT-101 y considerablemente achicado al cabo de seis meses de tratamiento (*abajo*).





CORTESIA DE CALANDO PHARMACEUTICALS Y CITY OF HOPE

dos agentes quimioterapéuticos (irinotecan y topotecan) aprobados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense. Las partículas de IT-101 están diseñadas para circular por la sangre del paciente y permanecer allí más de 40 horas. (El camptothecin por sí solo duraría escasos minutos.) Un período de circulación tan largo da tiempo a que el IT-101 llegue a los tumores y se acumule en ellos. Las partículas que han entrado en las células tumorales liberan lentamente el camptothecin para reforzar su acción. A medida que el fármaco se va liberando, los componentes restantes de la nanopartícula se disgregan y los monómeros del polímero se eliminan por el riñón sin daño alguno.

En los ensayos clínicos se consiguió dosificar el fármaco con miras a obtener una buena calidad de vida sin sufrir los efectos secundarios típicos de la quimioterapia (vómitos, diarrea y alopecia), ni añadir otros nuevos. Durante el tratamiento se logra una calidad de vida sorprendente; aunque las pruebas de fase I se centran en la seguridad del fármaco, atestiguaron también que éste ejercía cierta actividad. Los resultados se mostraron alentadores; los pacientes examinados en la fase I habían pasado antes por numerosas sesiones de terapia normal, todas ellas fallidas. Tras completar los seis meses de la prueba, varios de los pacientes continúan tomando el fármaco con un fin compasivo (al margen del ensayo clínico). Entre los que sobreviven un largo plazo, de uno o más años, se incluyen pacientes con cáncer avanzado de pulmón, riñón y páncreas.

Por ser tan bajo el perfil de este fármaco en cuanto a efectos secundarios, se someterá seguidamente a un ensayo de fase II (eficacia) en mujeres con cáncer de ovario que hayan recibido quimioterapia. En vez de esperar y observar, sin hacer nada, el avance del cáncer, se administrará el IT-101 a modo de terapia de mantenimiento con la esperanza de que corte el progreso de la enfermedad. Los resultados de las pruebas con IT-101, unidos a otras noticias alentadoras sobre los ensayos de diversos tratamientos con nanopartículas, empiezan a perfilar una imagen de lo que podría conseguir la nanoterapia. Sin duda, la próxima generación de nanopartículas sintéticas, más refinadas, deja entrever el poder de esta técnica y la importancia que seguirán teniendo estos fármacos para una visión sistémica de la enfermedad y su tratamiento.

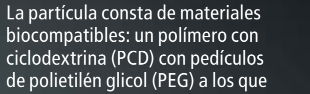
Calando Pharmaceuticals de Pasadena, California, inició en 2008 las pruebas de un sistema de obtención de ARNsi inventado por uno de los autores (Davis). En este método, más moderno, las proteínas de la superficie de las partículas se dirigen a receptores específicos que se hallan en concentraciones elevadas en la superficie de las células cancerosas. Una vez en el interior celular, las partículas liberan moléculas de ARNsi, personalizadas para adaptarse a un determinado gen de interés e inhibir la fabricación de la proteína codificada por ese gen.

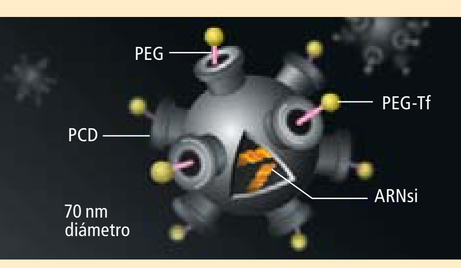
Sin embargo, esta nanoterapia multifuncional no es más que el principio de la historia. Al ahondar en los principios funcionales de las nanopartículas en el organismo humano, podrá aplicarse el concepto para crear un sis-

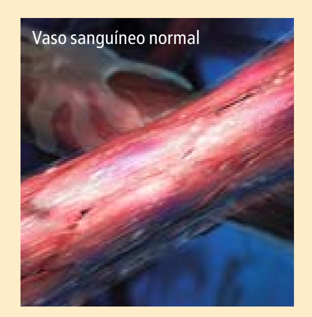
DISEÑADO PARA ADMINISTRAR

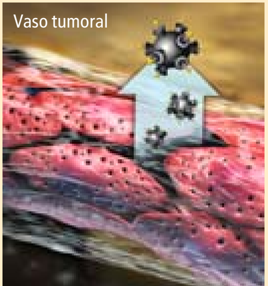
Una nanopartícula experimental con fines terapéuticos, la CALAA-01, ilustra algunas de las ventajas que ofrecen estos agentes. Además de su tendencia natural a acumularse en los tumores, las nanopartículas pueden, por su diseño, apuntar a uno o varios de los receptores comunes de las células cancerosas. El modo de penetración celular de las partículas les permite escapar a las bombas que, en la célula, expulsan algunos fármacos.

ESTRUCTURA PERSONALIZADA
La partícula consta de materiales biocompatibles: un polímero con ciclodextrina (PCD) con pedículos de polietilén glicol (PEG) a los que se adhieren proteínas transferrín (Tf). En el interior se almacenan hasta 2000 moléculas de ARNsi, los agentes terapéuticos.



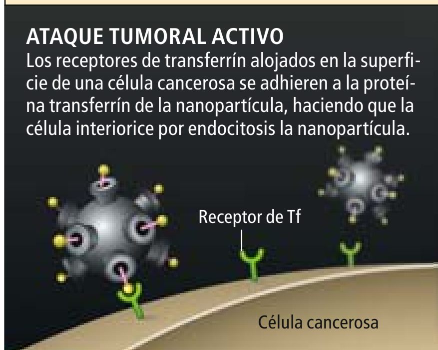


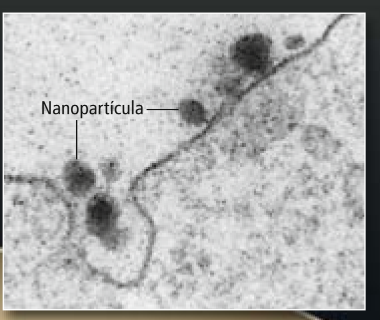


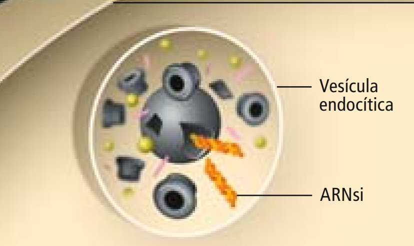


ATAQUE TUMORAL PASIVO
Las partículas que entran en la sangre de un paciente circulan libremente, pero no atraviesan la mayoría de las paredes vasculares. Los vasos de un tumor presentan una porosidad desmesurada y dejan pasar las nanopartículas, que se acumulan en el tejido tumoral.

ATAQUE TUMORAL ACTIVO
Los receptores de transferrín alojados en la superficie de una célula cancerosa se adhieren a la proteína transferrín de la nanopartícula, haciendo que la célula interiorice por endocitosis la nanopartícula.







LIBERACION CONTROLADA
Ya en el interior de la célula, un sensor químico alojado en la nanopartícula responde al bajo pH del interior de la vesícula endocítica: provoca la desagregación de la nanopartícula y, al propio tiempo, la liberación de las moléculas de ARNsi que impiden que una instrucción génica sea traducida a una proteína que la célula cancerosa necesita para sobrevivir.

JEN CHRISTIANSEN (*diagramas nanopartícula*); KEITH KASNOT (*vasos sanguíneos*); CORTESIA DE SWAROOP MISHRA *Instituto de Tecnología de California (micrografía)*

tema terapéutico basado en la combinación de fármacos, cada uno con un ritmo de liberación personalizado. Si se deseara inhibir una proteína que obstruye la acción de un fármaco, por ejemplo, cabría la opción de crear una nanopartícula que liberara primero el ARNsi que inhibe el gen productor de esa proteína y luego el fármaco. Al comprender mejor los detalles moleculares de la transición de salud a enfermedad, y viceversa, crecerá la importancia de las nanopartículas en la terapia oncológica molecular.

La imagen completa

Propugnamos un enfoque sistémico del cáncer porque creemos que el análisis de las redes dinámicas alteradas por la enfermedad y su comprensión patológica, en términos mecánicos, puede transformar todos los aspectos de la práctica médica: afinar el diagnóstico, descubrir nuevos enfoques terapéuticos e incluso preventivos. Considerar la enfermedad desde el ángulo de la biología de sistemas promueve el desarrollo de numerosas técnicas: microfluídica, nanotecnia, instrumentos de medida y visualización, y avances en computación que permitan analizar, integrar y construir modelos de grandes volúmenes de información biológica.

En los próximos 10 o 20 años, al menos dos nuevos enfoques van a revolucionar la medicina predictiva y personalizada. La secuencia de genomas humanos nos permitirá predecir, con creciente precisión, la salud de un individuo. A través de análisis de proteínas en sangre (nada costosos) podremos evaluar, de forma regular e integral, la evolución de la salud del individuo.

La medicina preventiva comienza por identificar las proteínas sobre las que hay que actuar, dentro de una red afectada, para que su comportamiento regrese a la normalidad; éstas serán, en último término, la base de fármacos profilácticos. Una mujer propensa a sufrir cáncer de ovario, que a los 30 años empiece a tomar un nanoterapéutico diseñado para contrarrestar la causa molecular del riesgo, podría rebajar del 40 al 2 por ciento la probabilidad de desarrollar el tumor.

Conocimientos de esta índole sobre las causas de la salud y la enfermedad permitirán, asimismo, que los pacientes participen en las decisiones sobre la propia salud, a la manera en que los diabéticos cuentan hoy con instrumentos e información que les ayudan a mantener su bienestar cotidiano.

El desarrollo de una medicina predictiva, personalizada, preventiva y participativa tendrá una amplia repercusión social. La industria sanitaria deberá modificar sus planes de negocio, que en la actualidad no logran rentabilizar la producción de fármacos de alta eficacia. Las técnicas que ahora nacen conducirán a la digitalización de la medicina —lo que permitirá extraer de moléculas, células o individuos información sobre la enfermedad—, igual que se han digitalizado la información y las comunicaciones en los últimos 15 años. Las nuevas técnicas de alto rendimiento y bajo coste rebajarán la partida destinada a atención sanitaria, poniéndola al alcance de todos, incluso en los países en vías de desarrollo.

En cuanto al cáncer, de aquí a diez años deberían hacerse realidad promesas muy sugestivas: primera, que los diagnósticos presintomáticos a partir de análisis de sangre detecten tumores incipientes, que puedan curarse con las terapias al uso; segunda, que los cánceres de un tejido particular (por ejemplo, mamas o próstata) se subdividan en tipos tratables con fármacos que ofrezcan índices de curación elevados; tercera, que la identificación de las redes alteradas por la enfermedad acelere el desarrollo de fármacos más baratos y más eficaces. Este novedoso enfoque médico encierra, pues, el potencial de transformar la atención sanitaria para casi todo el mundo.

TERAPIAS NANOMETRICAS

Las partículas nanoscópicas diseñadas para el tratamiento del cáncer contienen fármacos que se usan en la quimioterapia actual: por ejemplo, la doxorrubicina, que se aplica encapsulada en liposomas. Se utilizan también combinaciones experimentales en las que fármaco y polímero se mezclan o unen químicamente para formar nanopartículas (resinas compuestas, conjugados, micelas, dendrímeros). Otras partículas más recientes incorporan elementos que aumentan su afinidad por las células cancerosas y facilitan la penetración en las mismas.

TIPO DE PARTICULA	FASE DE DESARROLLO	EJEMPLOS
Liposoma	Aprobado por la FDA	DaunoXome, Doxil
Albuminoso	Aprobado por la FDA	Abraxane
Micela polimérica	Ensayos clínicos	Genexol-PM, SP1049C, NK911, NK012, NK105, NC-6004
Conjugado polímero-fármaco	Ensayos clínicos	XYOTAX (CT-2103), CT-2106, IT-101, AP5280, AP5346, FCE28068 (PK1), FCE28069 (PK2), PNU166148, PNU166945, MAG-CPT, DE-310, Pegamotecan, NKTR-102, EZN-2208
Liposoma dirigido	Ensayos clínicos	MCC-465, MBP-426, SGT-53
Partícula de polímero dirigido	Ensayos clínicos	FCE28069 (PK2), CALAA-01
Partícula maciza inorgánica o metálica	Ensayos clínicos (oro) y preclínicos	Nanotubos de carbono, partículas de sílice, partículas de oro (CYT-6091)
Dendrímero	Preclínico	Poliamidoamina (PAMAM)

TABLA ADAPTADA DE “NANOPARTICLE THERAPEUTICS: AN EMERGING TREATMENT MODALITY FOR CANCER”, POR MARK E. DAVIS ET AL., EN *NATURE REVIEWS DRUG DISCOVERY*, VOL. 7, N.º 9; SEPTIEMBRE DE 2008

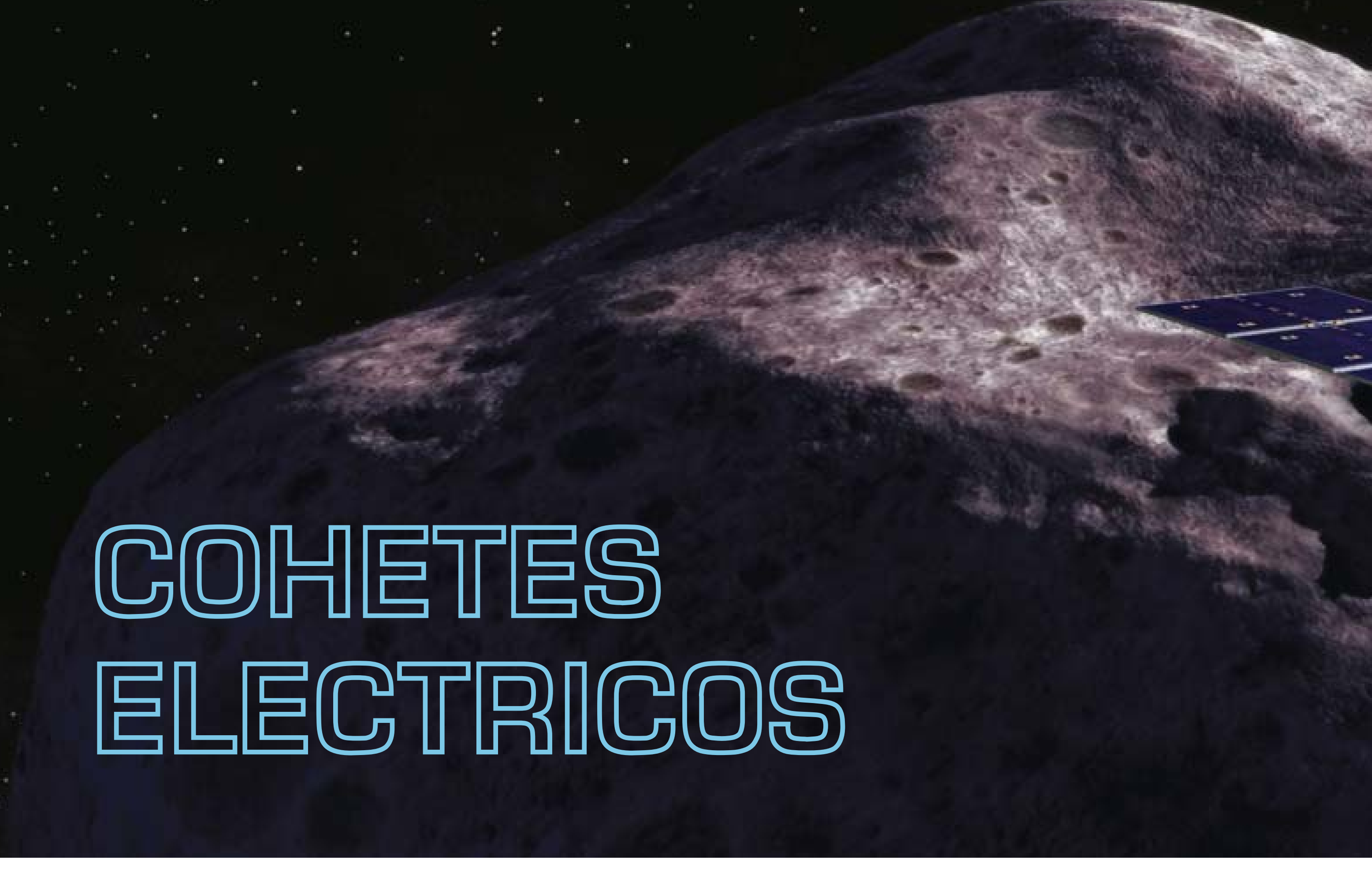
Bibliografía complementaria

NANOSYSTEMS BIOLOGY. James R. Heath y col. en *Molecular Imaging and Biology*, vol. 5, n.º 5, págs. 312-325, septiembre/octubre, 2003.

NANOTECHNOLOGY AND CANCER. James R. Heath y Mark E. Davis en *Annual Review of Medicine*, vol. 59, págs. 251-265; febrero, 2008.

NANOPARTICLE THERAPEUTICS: AN EMERGING TREATMENT MODALITY FOR CANCER. Mark E. Davis y col. en *Nature Reviews Drug Discovery*, vol. 7, n.º 9, págs. 771-782; septiembre, 2008.

INTEGRATED BARCODE CHIPS FOR RAPID, MULTIPLEXED ANALYSIS OF PROTEINS IN MICROLITER QUANTITIES OF BLOOD. Rong Fang y col. en *Nature Biotechnology*. Publicación avanzada en la Red: 16 de noviembre de 2008.



COHETES ELECTRICOS

CONCEPTOS BASICOS

- En los cohetes ordinarios el empuje se genera quemando un combustible químico. Los cohetes eléctricos propulsan los ingenios espaciales acelerando nubes de partículas cargadas, o plasmas, mediante la aplicación de campos eléctricos o electromagnéticos.
- Aunque los cohetes eléctricos ofrecen unos empujes mucho menores que sus parientes químicos, al final pueden comunicar a las naves espaciales unas velocidades mayores para una misma cantidad de propulsante.
- La capacidad de los cohetes eléctricos de alcanzar grandes velocidades y su mejor aprovechamiento del combustible los hace muy valiosos para la exploración del espacio profundo.

La sonda espacial Amanecer (*Dawn*) de la NASA navega más allá de la órbita de Marte hacia el cinturón de asteroides. Con ella se quiere saber más acerca del nacimiento del sistema solar. Su meta son los asteroides Vesta y Ceres, los restos de mayor tamaño aún existentes de los embriones planetarios que hace unos 4570 millones de años, con sus choques y combinaciones, formaron los planetas de hoy.

Pero esta misión, lanzada en septiembre de 2007, no es notable sólo por sus objetivos. Amanecer se propulsa merced a una técnica espacial que empieza a ocupar un primer plano en las misiones de larga distancia: el motor cohete de plasma. Estos motores, actualmente en desarrollo en varias formas avanzadas, generan el empuje produciendo y manipulando eléctricamente propulsantes de gas ionizado, en vez de quemar combustibles químicos líquidos o sólidos, como los cohetes ordinarios.

Los diseñadores de Amanecer, miembros del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, eligieron un motor de plasma para que propulsase la sonda atendiendo a su elevado rendimiento: requiere sólo una décima parte del combustible que un motor cohete químico habría necesitado para llegar al cinturón de asteroides. Si los planificadores del proyecto hubieran decidido instalar un motor tradicional, el vehículo llegaría a Vesta o a Ceres, pero no a ambos.

Desde luego, los cohetes eléctricos, así se les llama también, se están convirtiendo rápidamente en las mejores opciones para enviar sondas a blancos muy lejanos. Los últimos éxitos posibilitados por la propulsión eléctrica incluyen la visita a un cometa del vehículo de la NASA *Espacio Profundo 1*, viaje extra que pudo realizarse gracias al propulsante que sobró después de que la astronave cumpliese su objetivo principal. Motores de plasma propulsaron asimismo el intento de aterrizaje en un asteroide de la sonda japonesa Hayabusa, así como el viaje a la Luna de la nave espacial *SMART-1,* de la Agencia Espacial Europea.

A la luz de las comprobadas ventajas de dicha técnica, los planificadores de misiones al espacio profundo de EE.UU., Europa y Japón están optando por la propulsión a plasma para las misiones futuras de exploración de los planetas exteriores, la busca de planetas extrasolares similares a la Tierra y el uso del vacío espacial como laboratorio para estudios de física fundamental.

Ya hace tiempo

Aunque los cohetes de plasma sólo ahora están empezando a propulsar naves espaciales de muy largo alcance, hace tiempo que viene trabaján-

PAT RAWLINGS SAIC

Eficientes motores de plasma eléctrico propulsan la nueva generación de sondas espaciales hacia el sistema solar exterior

Edgar Y. Choueiri



1. LA SONDA ESPACIAL AMANECER, de la NASA, propulsada por un tipo de cohete eléctrico, el propulsor iónico, se acerca al asteroide Vesta, según una recreación artística. Vesta es su primer objetivo; luego visitará el asteroide Ceres, que flota a distancia en el espacio (*el punto luminoso arriba a la derecha*). Un motor cohete químico ordinario sólo podría llevar combustible para llegar a uno de esos dos asteroides.

dose en ellos con ese propósito. Se les venía empleando para otras tareas astronáuticas.

En los albores del siglo xx, los pioneros de la cohetería pensaron ya en usar electricidad para impulsar astronaves. Ernst Stuhlinger —miembro del legendario equipo de científicos cohetistas alemanes de Wernher Von Braun, la punta de lanza del programa espacial de EE.UU.— convirtió la idea en realidad técnica mediado el decenio de los cincuenta. Pocos años después, ingenieros del Centro de Investigación Glenn (conocido entonces como Lewis) de la NASA construyeron el primer cohete eléctrico operativo. En 1964, ese motor efectuó un vuelo suborbital a bordo del *Ensayo 1 del Cohete Eléctrico Espacial;* funcionó media hora, antes de que el ingenio cayera a tierra.

Mientras tanto, investigadores de la ex Unión Soviética trabajaban por su cuenta en los cohetes eléctricos. Desde los años setenta, los planificadores de misiones han preferido esta técnica porque ahorra propulsante, a la vez que facilita el mantenimiento de la *actitud* (orientación) y la posición orbital de los satélites de telecomunicaciones en órbita geosíncrona.

Realidades

Las ventajas que ofrecen los motores de plasma llaman más la atención cuando se tienen en cuenta los inconvenientes de los cohetes corrientes. Cuando nos imaginamos una nave surcando el oscuro vacío rumbo a un planeta remoto, solemos figurárnosla arrastrando una estela larga y ardiente que sale de las toberas. Pero la realidad es totalmente diferente: las expediciones al sistema solar exterior han sido casi todas sin cohetes, pues la mayoría del combustible se consume en los minutos iniciales de funcionamiento y se deja que la nave recorra por inercia el resto del trayecto hasta el objetivo.

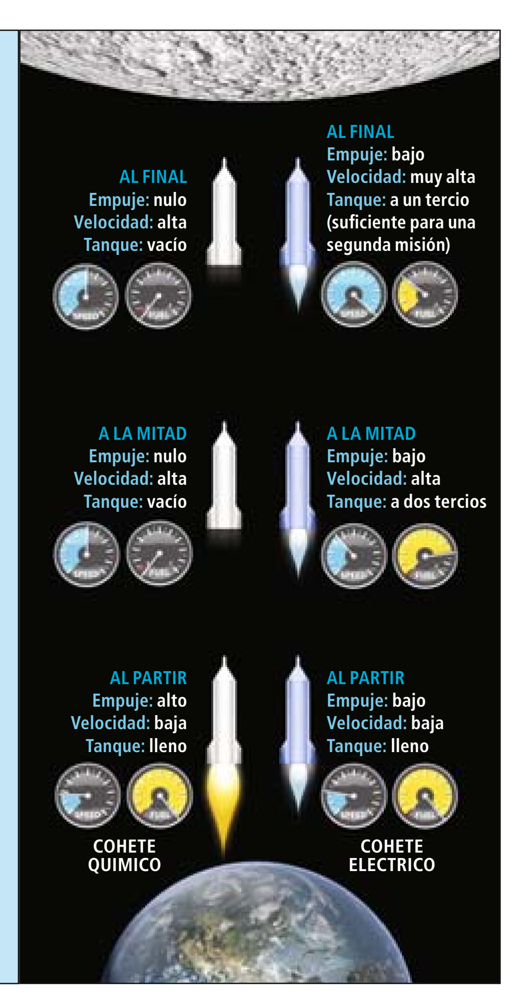
Todos los ingenios espaciales son lanzados desde la superficie terrestre por cohetes químicos y se pueden efectuar correcciones durante el viaje con propulsores de ese tipo. Pero no sirven para la propulsión en exploraciones del espacio profundo, ya que requerirían unas cantidades enormes de combustible, excesivas para que se las pudiera poner en órbita de una manera práctica y económica. Colocar un objeto en órbita terrestre cuesta más de 20.000 dólares por kilogramo.

Para conseguir, sin combustible adicional, las trayectorias y las altas velocidades necesarias para viajes largos de gran precisión, muchas sondas de espacio profundo han tenido que perder tiempo —años, a veces— desviándose de su camino hacia planetas o lunas que les administrasen impulsos gravitatorios en la dirección adecuada (a estas operaciones se las

Cohetes químicos frente a cohetes eléctricos

Los sistemas de propulsión químicos y eléctricos resultan adecuados para misiones de tipos diferentes. Los cohetes químicos (*izquierda*) generan enseguida un empuje muy elevado, por lo que se aceleran rápidamente hasta altas velocidades, aunque para ello consumen mucho combustible. Esas características los hacen adecuados para viajes de corto recorrido.

Los cohetes eléctricos (*derecha*), que usan plasma (gas ionizado) como propulsante, generan empujes mucho menores, pero su reducidísimo consumo de propulsante les permite funcionar durante períodos más largos. Y en el entorno libre de fricción del espacio, una fuerza pequeña aplicada durante algún tiempo puede conseguir velocidades tan altas o mayores. Con tales propiedades, los cohetes eléctricos ofrecen unas condiciones perfectas para misiones con objetivos múltiples en el espacio profundo.



KEVIN HAND

denomina "maniobras asistidas por gravedad"). Tan retorcidos trayectos limitan las misiones a ventanas de lanzamiento bastante pequeñas; sólo el despegue dentro de un intervalo de tiempo concreto y muy corto asegura que el ingenio pasará junto a un cuerpo cósmico que haga de impulsor gravitatorio.

Aún peor, tras un viaje de años hacia su destino, lo habitual es que a un vehículo propulsado por un motor cohete químico no le quede combustible para frenar. Esa sonda habrá de poder encender su cohete para decelerarse en una medida que le permita entrar en órbita alrededor de su objetivo y poder así llevar a cabo observaciones científicas extensas. Si no puede frenarse, se limitará a un mero encuentro fugaz con el objeto a estudiar. Así, tras más de nueve años de viaje, la *Nuevo Horizonte*, una sonda de la NASA lanzada en 2006, no conseguirá sino un breve encuentro de menos de un día terrestre con su objetivo primordial, Plutón, el recientemente degradado "planeta enano".

Ecuación del cohete

A quienes se pregunten por qué los ingenieros no han logrado enviar al espacio combustible químico suficiente para eludir los inconvenientes propios de las misiones de larga duración, les precisaré los imponentes obstáculos a que se enfrentan. Me serviré de la ecuación del cohete, la fórmula empleada por los planificadores de las misiones para calcular la masa de combustible necesaria en una misión dada. Konstantin E. Tsiolkovsky, uno de los padres de la cohetería y los vuelos espaciales, la enunció en 1903.

Lisa y llanamente, la ecuación del cohete plantea el hecho intuitivo de que, cuanto mayor sea la velocidad a la que el propulsante escape del cohete, tanto menor será la cantidad necesaria para ejecutar una maniobra. Pensemos en un lanzador de béisbol (un motor cohete) con un cubo lleno de pelotas (el propulsante) de pie sobre un monopatín (una astronave). Cuanto más rápidas sean las bolas que lance hacia atrás (o sea, cuanto mayor sea la velocidad de los gases de escape), tanto más deprisa se estará moviendo el monopatín en el sentido contrario cuando arroje la última bola; o, lo que es lo mismo, menos bolas (menos propulsante) tendrá que lanzar para aumentar la velocidad del monopatín en cierta cantidad en un instante dado. A ese incremento de la velocidad del monopatín se le llama "delta-v".

En términos más específicos, la ecuación relaciona la masa de propulsante requerida por un cohete para llevar a cabo una misión en el espacio ultraterrestre con dos velocidades cruciales: la velocidad a la cual será eyectado el gas del vehículo y la delta-v de la misión (cuánto aumentará la velocidad del vehículo a resultas de la eyección). Delta-v corresponde a la energía que una nave debe emplear para alterar su movimiento inercial y ejecutar una determinada maniobra en el espacio. Para una técnica de cohetes dada (o sea, la que produce una velocidad de escape de los gases determinada), la ecuación del cohete traduce la delta-v para una misión en la masa de propulsante necesario para llevarla a cabo. Por tanto, el valor delta-v puede considerarse como una especie de "etiqueta del precio" de una misión, pues el coste total de la misma viene dominado por lo que cueste lanzar el propulsante necesario.

Los cohetes químicos convencionales tienen unas velocidades de escape de los gases bajas, de tres a cuatro km/s, lo que convierte en problemático su empleo. Además, la naturaleza exponencial de la ecuación del cohete impone que la fracción de la masa inicial del vehículo correspondiente al combustible —la "fracción de masa propulsante"— crezca exponencialmente con delta-v. Por ello, el combustible necesario para el elevado valor de delta-v propio de una misión al espacio

El autor

Edgar Y. Choueiri enseña astronáutica y física aplicada en la Universidad de Princeton, cuyo Laboratorio de Propulsión Eléctrica y Dinámica de Plasmas y el Programa de Física Técnica dirige. Aparte de las investigaciones sobre la propulsión a plasma, trabaja sobre técnicas matemáticas que pudieran permitir un registro y reproducción precisos de música en tres dimensiones.

profundo puede representar casi la totalidad de la masa inicial de la nave y dejar poco espacio para otras cosas.

Consideremos un par de ejemplos. Para viajar a Marte desde una órbita terrestre baja se requiere una delta-v de unos 4,5 km/s. Según la ecuación del cohete, un cohete químico ordinario requeriría, para ejecutar esa transferencia interplanetaria, que más de los dos tercios de la masa de la astronave fuese propulsante. Para periplos más ambiciosos —tales como las expediciones a los planetas exteriores, que requieren una delta-v de 35 a 70 km/s—, los cohetes químicos deberían estar compuestos por más del 99,98 por ciento de combustible. Tal configuración no dejaría sitio para otros equipos o cargas útiles. Conforme las sondas viajan cada vez más lejos dentro del sistema solar, los cohetes químicos se van haciendo cada vez menos útiles, salvo que los ingenieros hallen un procedimiento para elevar de modo importante la velocidad de escape de los gases.

Ese propósito se ha mostrado hasta ahora de consecución muy difícil, porque alcanzar unas velocidades de escape de gases muy elevadas requiere unas temperaturas de combustión altísimas. La capacidad de llegar a las temperaturas necesarias está limitada tanto por la cantidad de energía que puede liberarse mediante las reacciones químicas conocidas como por el punto de fusión de las paredes del cohete.

La solución plasma

En cambio, los sistemas de propulsión a plasma ofrecen unas velocidades de escape mucho mayores. En vez de quemar un combustible químico para generar el empuje, el motor de plasma acelera plasmas —nubes de átomos o moléculas cargadas eléctricamente— hasta velocidades muy altas. Un plasma se produce agregando energía a un gas, irradiándolo, por ejemplo, con láseres, microondas u ondas de radiofrecuencia, o sometiéndolo a unos campos eléctricos muy intensos. La energía adicional desprende electrones de los átomos o moléculas del gas, dejando a éste positivamente cargado y a los electrones con libertad para moverse en el seno del gas ionizado, lo cual hace de éste un conductor mejor que el cobre.

Como los plasmas contienen partículas dotadas de carga, en cuyo movimiento intervienen intensamente los campos eléctricos y magnéticos, la aplicación de un campo eléctrico o magnético a un plasma acelerará sus constituyentes para lanzarlos desde la parte posterior de un vehículo y crear una fuerza de empuje. Esos campos pueden generarse mediante electrodos e imanes, la inducción de antenas exteriores o de bobinas, o impulsando corrientes eléctricas a través del plasma.

Lo habitual es que la energía eléctrica necesaria para crear y acelerar los plasmas proceda de paneles solares que capten energía solar. Pero los vehículos de espacio profundo que van más allá de Marte deben utilizar fuentes de energía atómica, pues la solar se debilita mucho a grandes distancias del Sol. Las pequeñas sondas robóticas actuales emplean dispositivos termoeléctricos que usan el calor de la desintegración de un isótopo radiactivo, pero las más ambiciosas misiones del futuro podrían necesitar reactores de fisión (o incluso de fusión) nuclear. El reactor nuclear no se activaría mientras la nave no estuviese a una distancia segura de la Tierra.

Hay tres tipos de sistemas de propulsión a plasma lo bastante maduros para ser empleados en misiones de larga distancia. El más utilizado —y el que propulsa a Amanecer— es el propulsor iónico.

El propulsor iónico

Los orígenes del motor iónico, uno de los propulsores eléctricos que más ha arraigado, hay que buscarlos en las ideas del pionero de la cohetería norteamericana Robert H. Goddard, adquiridas cuando todavía era alumno de doctorado en el Instituto Politécnico de Worcester, hace ahora un siglo. Los motores iónicos consiguen velocidades de escape comprendidas entre 20 y 50 km/s.

En su versión común, el motor consigue la energía de paneles fotovoltaicos. Es un cilindro rechoncho, no mayor que un balde, embocado hacia popa. En su interior, el gas xenón procedente del depósito de propulsante fluye a una cámara de ionización donde un campo electromagnético le arranca electrones al gas para crear el plasma. Los iones positivos de éste se extraen y aceleran seguidamente hasta altas velocidades mediante la acción de un campo eléctrico aplicado entre dos electrodos de rejilla. Cada ion positivo dentro del campo sufre la intensa fuerza con que del mismo tira el electrodo negativo montado a popa y, por tanto, se acelera hacia atrás.

Al escapar del cohete, los iones positivos dejan en la astronave una carga negativa; si se permitiera que aumentara, atraería los iones de nuevo hacia la nave y anularía con ello el empuje. Con el fin de obviar el problema, una fuente externa de electrones (un cátodo negativo o un cañón electrónico) inyecta electrones en el flujo positivo para neutralizarlo eléctricamente y, así, la nave queda también neutra.

Actualmente hay docenas de propulsores iónicos en servicio en ingenios espaciales co-

LOS ORIGENES DE LOS COHETES ELECTRICOS

1903: Konstantin E. Tsiolkovsky deduce la "ecuación del cohete", de uso generalizado para calcular el consumo de combustible en las misiones espaciales. En 1911 conjetura que podrían emplearse campos eléctricos para acelerar partículas cargadas y conseguir así el empuje.

1906: Robert H. Goddard concibe la posibilidad de propulsar cohetes acelerando electrostáticamente partículas cargadas. En 1917 inventa y patenta un precursor del motor iónico.

1952: Ernst Stuhlinger idea formas de mejorar las prestaciones del motor cohete de iones eléctricos.

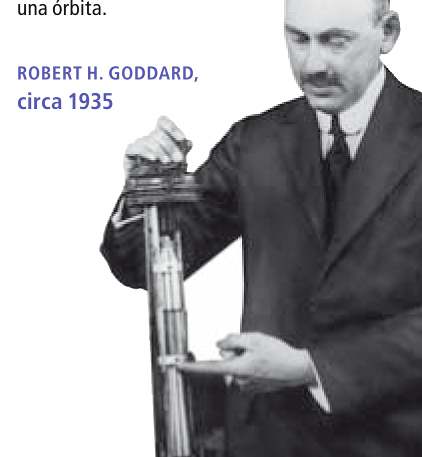
1962: Trabajos de investigadores soviéticos, europeos y estadounidenses dan lugar a la primera descripción publicada del propulsor Hall, un tipo de cohete de plasma más potente.

1962: Adriano Ducati descubre el mecanismo subyacente al propulsor magnetoplasmadinámico, el tipo más potente de cohete de plasma.

1964: La astronave *Ensayo 1 del Cohete Eléctrico Espacial* de la NASA efectúa con éxito la primera prueba en vuelo espacial de un motor iónico.

1972: El satélite soviético *Meteor* lleva a cabo el primer vuelo espacial de un propulsor Hall.

1999: La sonda *Espacio Profundo 1* del Laboratorio de Propulsión a Chorro lleva a cabo la primera demostración de un motor iónico como sistema de propulsión principal de una astronave que escapa de la gravedad terrestre desde una órbita.



ROBERT H. GODDARD, circa 1935

HULTON ARCHIVE/GETTY IMAGES

El motor de propulsión a plasma más común

En este motor el propulsante de plasma se crea bombardeando un gas neutro con los electrones que emite un filamento eléctrico caliente. A continuación se separa del plasma a los iones positivos resultantes y se los acelera hacia el exterior mediante un campo eléctrico creado por una alta tensión aplicada entre dos electrodos de rejilla. La descarga mecánica de los iones genera empuje en el sentido contrario.

Situación: Operativo
Potencia consumida: entre 1 y 7 kilowatt
Velocidad de escape: entre 20 y 50 km/s
Empuje: entre 20 y 250 milinewton
Rendimiento: entre 60 y 80 por ciento
Aplicaciones: Mantenimiento en órbita y control de la orientación (*actitud*) de los satélites en servicio; propulsión principal de las actuales astronaves robóticas

1 Un electrodo caliente (el cátodo) emite electrones que son acelerados por un campo magnético en una cámara de ionización.

2 El xenón propulsante procedente del tanque se introduce en la cámara de ionización.

3 Cuando los electrones bombardean el gas xenón, los átomos de éste se convierten en iones positivos.

4 El potencial eléctrico entre los electrodos de rejilla dotados de carga opuesta atrae los iones y los acelera hacia el exterior de la nave. Así se crea empuje.

5 Los electrones emitidos por un electrodo caliente neutralizan el haz iónico positivo cuando éste abandona el motor para que los iones no sean recaptados por la nave y se reduzca el empuje neto.

Del depósito de xenón
Imán anular
Electrodo caliente
Atomo de xenón
Cámara de ionización
Imanes anulares
Rejilla negativa
Rejilla positiva
Plasma
Empuje
Ion de xenón
Electrón
Electrodo caliente
Inyector de electrones/ neutralizador



2. PRUEBA DE ENCENDIDO de un propulsor iónico, de 40 centímetros de diámetro, en un cámara de vacío de un laboratorio. El color azul de la estela de escape se debe a los átomos de xenón cargados.

merciales, en su mayoría satélites de comunicaciones en órbitas geosíncronas, que sirven para mantener la posición y el control de la actitud. Se los utiliza porque ahorran millones de dólares por nave al reducir notablemente la masa de propulsante que sería necesaria para la propulsión química.

A finales del siglo XX, *Espacio Profundo 1* fue el primer ingenio espacial del mundo en emplear un sistema de propulsión eléctrica para escapar de la gravedad terrestre desde una órbita. Seguidamente, la sonda ganó unos 4,3 km/s de velocidad consumiendo menos de 74 kilogramos de propulsante de xenón (más o menos la masa de un barril de cerveza sin empezar), para atravesar en su vuelo el polvo de la cola del cometa Borrelly. Fue el mayor incremento de velocidad conseguido hasta hoy mediante propulsión (y no mediante asistencia gravitatoria) por un ingenio espacial. Amanecer deberá batir pronto ese récord con un aumento de 10 km/s. Ingenieros del Laboratorio de Propulsión a Chorro han mostrado hace poco unos propulsores iónicos capaces de funcionar sin fallos, ininterrumpidamente, durante más de tres años.

Las prestaciones de un cohete de plasma la determina no sólo la velocidad de las partículas de descarga, sino también la densidad de empuje, que es la fuerza de empuje que genera un motor por unidad de superficie de la abertura de escape. Los motores iónicos y los propulsores electrostáticos similares adolecen de un importante punto débil, la "limitación por carga espacial", que reduce drásticamente la densidad de empuje: cuando los iones positivos pasan entre las rejillas electrostáticas, en esa zona se acumula una carga positiva; ello reduce la intensidad del campo eléctrico acelerador.

Por culpa de ese fenómeno, el motor iónico de *Espacio Profundo 1* produce una fuerza de empuje aproximadamente equivalente al peso de una hoja de papel; más que al rugiente cohete de una película de ciencia ficción, se parecería a un coche que tardase dos días en acelerarse de cero a 100 km/h. Pero en tanto podamos esperar el tiempo suficiente (muchos meses, por lo común), esos motores acabarán por alcanzar las elevadas delta-v necesarias para un viaje largo. En el vacío del espacio, donde no hay resistencias, incluso el más insignificante

DON FOLEY; FUENTE: NASA/JPL (*máquina de iones*); PAT RAWLINGS SAIC (*ilustración*)

impulso, si se aplica continuamente, acaba por crear una velocidad de propulsión elevada.

Propulsores Hall

Un sistema de propulsión a plasma, el propulsor Hall, evita la limitación por carga espacial y, por tanto, puede acelerar una nave hasta grandes velocidades con mayor rapidez (merced a su mayor densidad de empuje) que un motor iónico de tamaño comparable. Se trata de una técnica que ha venido ganando aceptación en Occidente desde comienzos de la década de los noventa, tras treinta años de constante desarrollo en la ex Unión Soviética. El propulsor Hall pronto estará listo para hacerse cargo de misiones de largo alcance.

El sistema se basa en el efecto Hall, descubierto en 1879 por Edwin H. Hall, alumno entonces de doctorado de física en la Universidad Johns Hopkins. Hall demostró que, cuando un campo eléctrico y un campo magnético son perpendiculares entre sí dentro de un conductor, se genera una corriente eléctrica (llamada corriente Hall) perpendicular a ambos campos.

En un propulsor Hall se produce un plasma cuando una descarga eléctrica entre un cátodo negativo interior al ingenio y un ánodo positivo exterior al ingenio se abre paso a través de una masa de gas neutro interior al ingenio. El plasma así resultante es entonces acelerado hacia el exterior del motor cilíndrico mediante la fuerza de Lorentz; resulta ésta de la interacción entre un campo magnético radial aplicado y una corriente eléctrica (la corriente Hall, en este caso) que fluye en dirección azimutal; es decir, en "órbita" circular en torno al ánodo central. La corriente Hall se debe al movimiento de los electrones en los campos magnético y eléctrico. En función de la potencia disponible, la velocidad de escape del gas puede valer desde 10 hasta más de 50 km/s.

Este tipo de cohete eléctrico evita la formación de carga espacial acelerando la totalidad del plasma (tanto los iones positivos como los electrones negativos), con el resultado de que su densidad de empuje y por tanto su fuerza de empuje (y a la vez su delta-v potencial) son muchas veces mayor que las de un motor iónico del mismo tamaño. Más de 200 propulsores Hall han estado volando en satélites de órbita terrestre. Y fue un propulsor Hall lo que empleó la Agencia Espacial Europea para llevar, eficientemente y con poco gasto, su nave *SMART-1* hasta la Luna.

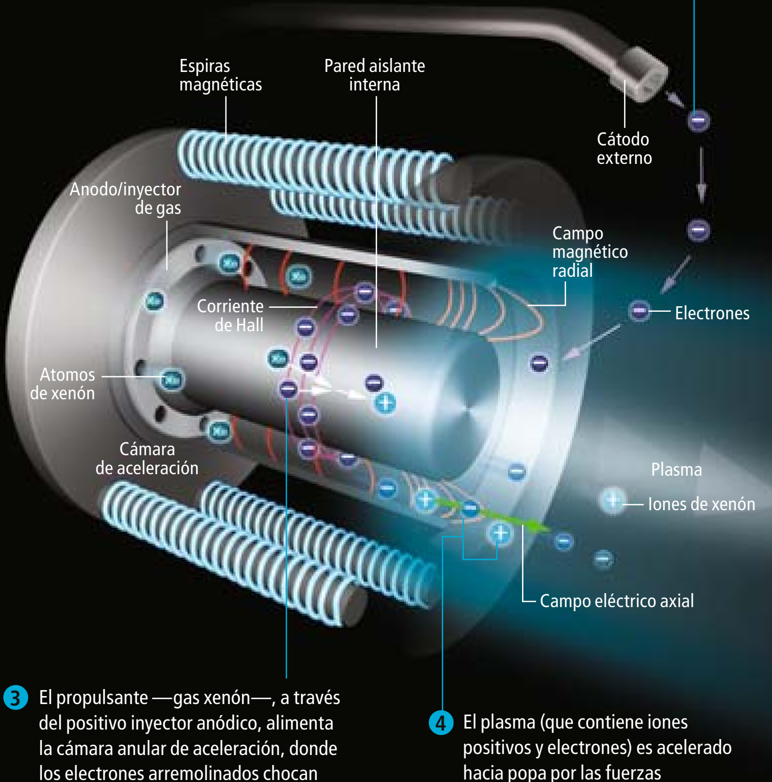
Se está intentando aumentar el tamaño de los actuales propulsores Hall para que admitan mayores potencias y generen unas velocidades de escape y unas fuerzas de empuje mayores. Los trabajos se proponen alargar su vida de

El motor de plasma: el último aspirante

La propulsión la genera el cruce de una corriente Hall y un campo magnético radial, con lo que los electrones giran alrededor del eje geométrico del artefacto. Esos electrones arrancan electrones de los átomos de xenón, produciendo iones de xenón; un campo eléctrico paralelo al eje geométrico acelera los iones flujo abajo. La densidad de fuerza propulsora de un propulsor Hall es mayor que la de un motor iónico, porque el gas de escape contiene tanto iones positivos como electrones, lo cual evita la acumulación de carga positiva que limitaría la intensidad del campo eléctrico acelerador.

1 El potencial eléctrico establecido entre un cátodo negativo externo y un ánodo positivo interno crea un campo eléctrico axial, en su mayor parte dentro de la cámara de aceleración.

2 Cuando se calienta, el cátodo emite electrones, algunos de los cuales son arrastrados flujo arriba hacia el ánodo. Cuando los electrones entran en la cámara, un campo magnético radial y el campo eléctrico axial los arremolinan en torno al eje geométrico del propulsor, formándose así una "corriente de Hall".



3 El propulsante —gas xenón—, a través del positivo inyector anódico, alimenta la cámara anular de aceleración, donde los electrones arremolinados chocan con los átomos de xenón, convirtiéndolos en iones positivos.

4 El plasma (que contiene iones positivos y electrones) es acelerado hacia popa por las fuerzas electromagnéticas resultantes de la interacción entre el campo magnético predominantemente radial y la corriente Hall.

Situación: Operativo en vuelo
Potencia consumida: entre 1,35 y 10 kilowatt
Velocidad de descarga: entre 10 y 50 kilómetros por segundo
Empuje: entre 40 y 600 milinewton
Rendimiento: entre 45 y 60 por ciento
Aplicaciones: Mantenimiento de la posición y control de la orientación (actitud) de los satélites en servicio; propulsión principal de astronaves robóticas de tamaño medio

PAT RAWLINGS *SAIC*; FUENTE: "PLUME REDUCTION IN SEGMENTED ELECTRODE HALL THRUSTER", POR Y. RAITSES, L. A. DORF, A. A. LITVAK Y N. J. FISCH, EN *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, VOL. 88, N.º 3; AGOSTO DE 2000

MAS DE 20.000 DOLARES

cuesta poner en órbita terrestre una carga útil de un kilogramo con motores cohete ordinarios. Tan elevado precio es una de las razones por las que los ingenieros no escatiman esfuerzos para rebajar al mínimo viable la masa de las naves espaciales. El combustible y su depósito son las partes más pesadas de los cohetes químicos.

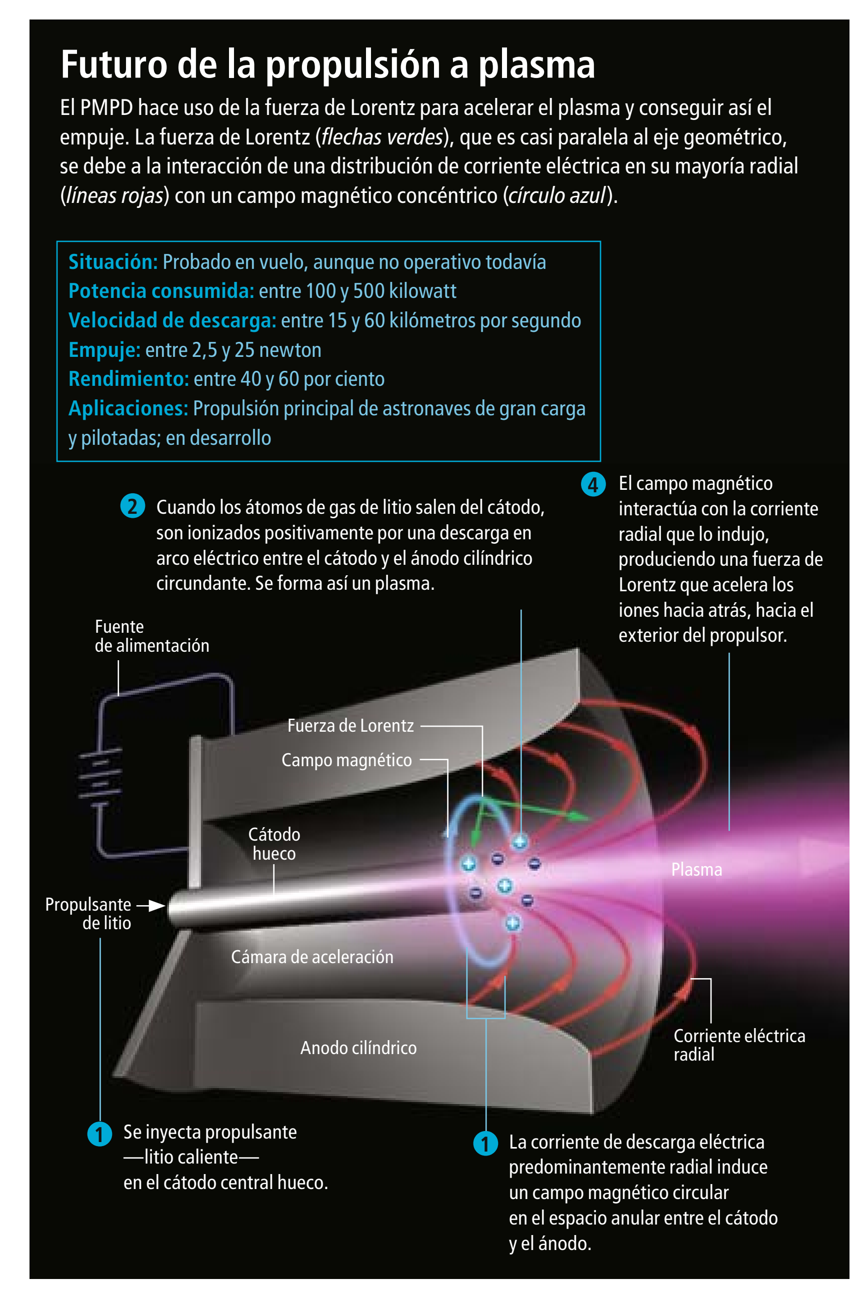
servicio hasta el número de años que se necesita para explorar el espacio profundo.

En el Laboratorio de Física de Plasmas de Princeton han dado un paso hacia esos objetivos implantando electrodos segmentados en las paredes de un propulsor Hall. Esos electrodos configuran el campo eléctrico de modo que concentra el plasma en un estrecho haz de escape. El diseño reduce la inútil componente no axial del empuje y aumenta la vida de servicio del sistema manteniendo el plasma lejos de las paredes del motor. Unos ingenieros alemanes han conseguido resultados parecidos con campos magnéticos adecuadamente conformados. Otros investigadores de la Universidad de Stanford han demostrado que, revistiendo las paredes con diamante sintético policristalino, muy duro, se incrementa sustancialmente la resistencia del motor a la erosión por el plasma. Tales mejoras acabarán haciendo los propulsores Hall aptos para misiones al espacio profundo.

Futuro de la propulsión a plasma

El PMPD hace uso de la fuerza de Lorentz para acelerar el plasma y conseguir así el empuje. La fuerza de Lorentz (*flechas verdes*), que es casi paralela al eje geométrico, se debe a la interacción de una distribución de corriente eléctrica en su mayoría radial (*líneas rojas*) con un campo magnético concéntrico (*círculo azul*).

Situación: Probado en vuelo, aunque no operativo todavía
Potencia consumida: entre 100 y 500 kilowatt
Velocidad de descarga: entre 15 y 60 kilómetros por segundo
Empuje: entre 2,5 y 25 newton
Rendimiento: entre 40 y 60 por ciento
Aplicaciones: Propulsión principal de astronaves de gran carga y pilotadas; en desarrollo



PAT RAWLINGS SAIC; FUENTE: UNIVERSIDAD DE PRINCETON

Los propulsores de la próxima generación

Un procedimiento para aumentar la densidad de empuje en la propulsión a plasma es aumentar la cantidad total de plasma que se acelera dentro del motor. Ahora bien, en un propulsor Hall, a medida que aumenta la densidad del plasma crece la frecuencia de los choques de los electrones con los átomos e iones, lo que dificulta más a los electrones el formar la corriente Hall necesaria para la aceleración. El propulsor magnetoplasmadinámico (PMPD) ofrece como alternativa un plasma más denso a costa de renunciar a la corriente Hall y recurrir en su lugar a una componente de corriente en su mayoría alineada con el campo eléctrico y menos propensa que la corriente Hall a la disrupción por colisiones atómicas.

En líneas generales, un PMPD es un cátodo central montado dentro de un ánodo cilíndrico mayor. El espacio anular entre el cátodo y el ánodo se rellena con un gas, habitualmente litio, ionizado por una corriente eléctrica que fluye radialmente desde el cátodo hacia el ánodo. Esa corriente induce un campo magnético azimutal (rodea el cátodo central) que interactúa con la misma corriente que lo indujo para generar la fuerza de Lorentz productora del empuje.

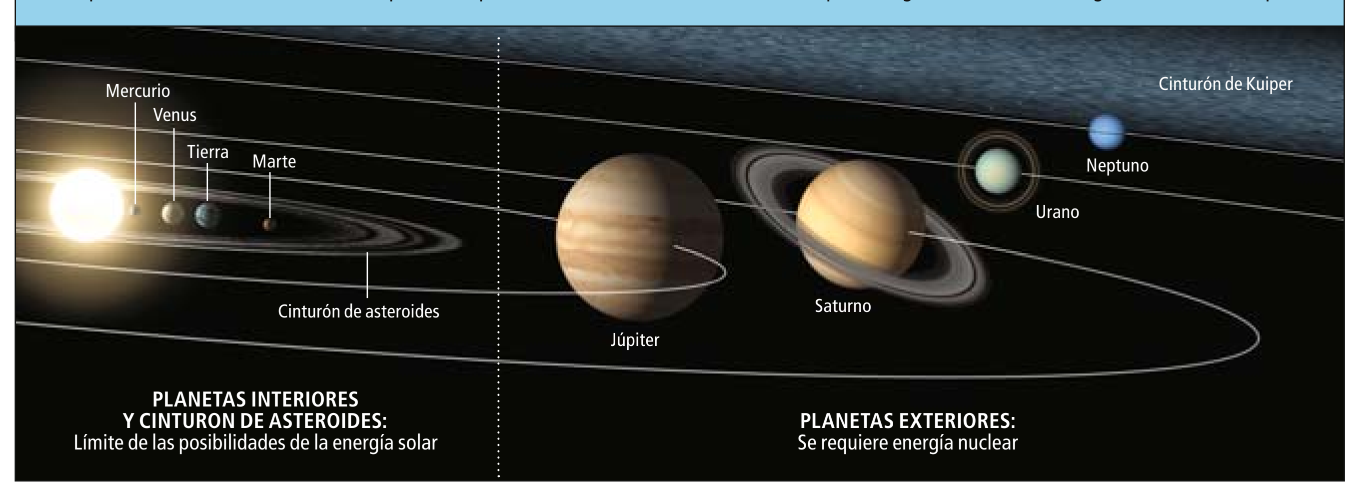
Un solo MPD del tamaño aproximado de un cubo de fregar transforma en empuje alrededor de un millón de watt de potencia eléctrica de origen solar o nuclear (suficiente para alimentar más de 10.000 bombillas corrientes), considerablemente más que el límite de potencia de los propulsores iónicos o Hall del mismo tamaño. Un PMPD puede producir velocidades de escape de entre 15 y 60 km/s.

Este diseño ofrece además control de aceleración: la velocidad de escape y el empuje pueden ajustarse variando la intensidad de la corriente eléctrica o el caudal del propulsante. El control de la aceleración permite a los planificadores de la misión alterar, según convenga, el empuje y la velocidad de escape de la astronave para optimizar la trayectoria.

Intensas investigaciones sobre los mecanismos que limitan las prestaciones y la vida de los motores MPD, tales como la erosión de los electrodos, las inestabilidades del plasma y la disipación de energía en éste, han desembocado en unos motores de altas prestaciones que emplean vapores de litio y bario como propulsantes. Esos elementos se ionizan más fácilmente, producen menos pérdidas de ener-

Energía solar y nuclear para los cohetes eléctricos

En los viajes al sistema solar interior, donde los rayos solares son intensos, las células solares proporcionan energía eléctrica suficiente. Pero los viajes a los planetas exteriores del sistema solar podrían requerir fuentes de energía nucleares. Un ingenio grande y pesado podría necesitar un reactor nuclear, pero a uno más pequeño y más ligero quizá le bastase un generador termoeléctrico que obtenga el calor de la desintegración de radioisótopos.



gía interna en el plasma y ayudan a mantener más frío el cátodo. La adopción de esos propulsantes de metal líquido y un cátodo con un insólito diseño estriado que altera el modo en que la corriente eléctrica interactúa con la superficie han dado como resultado una sustancial reducción de la erosión del cátodo. Estas innovaciones están conduciendo a unos PMPD más fiables.

Un equipo de investigadores universitarios y de la NASA ha terminado recientemente el diseño de un PMPD de litio de última hornada de nombre α^2, que en principio podría impulsar una nave de propulsión nuclear para que transportase cargas pesadas y personas a la Luna y Marte, o misiones robóticas a los planetas exteriores.

Gana la tortuga

Los propulsores iónicos, Hall y MPD constituyen tres variantes de la técnica de los cohetes eléctricos de plasma, las más maduras. Durante los últimos decenios los investigadores han desarrollado un buen número de conceptos afines hasta distintos niveles de disponibilidad. Algunos son motores pulsátiles de funcionamiento intermitente; otros son de funcionamiento continuo. Algunos generan el plasma mediante descargas eléctricas entre electrodos; otros lo generan con bobinas de inducción magnética o con la radiación producida por una antena. Los mecanismos que se emplean para acelerar el plasma varían asimismo: unos emplean fuerzas de Lorentz; otros lo aceleran haciendo que lo arrastren corrientes laminares generadas magnéticamente u ondas electromagnéticas viajeras. Hay incluso una variante que se propone que el plasma escape a través de unas invisibles "toberas" formadas por campos magnéticos.

En todos los casos, los cohetes de plasma aumentan su velocidad más lentamente que los cohetes ordinarios. Sin embargo, suelen llegar a los destinos lejanos con mayor rapidez y consiguen unas velocidades finales superiores a las de unos sistemas de propulsión ordinaria que empleasen la misma masa de propulsante: es la "paradoja de ir más despacio para llegar más deprisa". Así evitan los retardadores desvíos en busca de impulsos gravitatorios. Al igual que la lenta y tesonera tortuga de la fábula bate a la liebre que sólo acelera intermitentemente, en los maratonianos vuelos que en la venidera época de las exploraciones del espacio profundo serán cada vez más frecuentes ganará también el quelonio.

Hasta ahora los diseños más avanzados podían comunicar una delta-v de 100 km/s, demasiado poco para llevar una astronave hasta las estrellas lejanas, pero más que suficiente para visitar los planetas exteriores en un lapso de tiempo razonable. Se ha propuesto una misión al espacio profundo especialmente fascinante: recogería muestras de la luna de mayor tamaño de Saturno, Titán, de la que se cree que posee una atmósfera muy similar a la de la Tierra de hace eones.

Una muestra de la superficie de Titán brindaría una ocasión singular para buscar precursores químicos de la vida. La misión sería imposible con propulsantes químicos. Y, sin propulsión durante el trayecto, el periplo requeriría múltiples asistencias gravitatorias planetarias, añadiendo más de tres años al tiempo de viaje total. Una sonda impulsada por un cohete eléctrico lo haría en mucho menos tiempo.

Bibliografía complementaria

BENEFITS OF NUCLEAR ELECTRIC PROPULSION FOR OUTER PLANET EXPLORATION. G. Woodcock et al. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.

ELECTRIC PROPULSION. Robert G. Jahn y Edgar Y. Choueiri en *Encyclopedia of Phsysical Science and Technology*. Tercera Edición. Academic Press, 2002.

A CRITICAL HISTORY OF ELECTRIC PROPULSION: THE FIRST 50 YEARS (1906-1956). Edgar Y. Choueiri en *Journal of Propulsion and Power*, vol. 20, n.º 2, págs. 193-203; 2004.

PHYSICS OF ELECTRIC PROPULSION. Robert G. Jahn. Dover Publications, 2006.

FUNDAMENTALS OF ELECTRIC PROPULSION: ION AND HALL THRUSTERS. Dan M. Goebel e Ira Katz. Wiley, 2008.

DON DIXON

Reproducción sexual en el olivo

Juan de Dios Alché, Juan David Rejón, Cynthia Suárez y María Isabel Rodríguez

El olivo (*Olea europaea* L.) ha acompañado al hombre en el curso de su historia. Constituye uno de los cultivos de mayor importancia en los países mediterráneos. Aunque su multiplicación se realiza sobre todo de forma vegetativa (mediante estaquillas), es la reproducción sexual la responsable última de la formación del fruto.

A través del estudio de la formación del polen y el gineceo, vamos desentrañando la biología reproductiva de esta especie. Sin embargo, se desconocen todavía los mecanismos celulares y moleculares que permiten que ambas estructuras se reconozcan, interaccionen y se genere el tubo polínico: la estructura que dirige los núcleos espermáticos del polen hasta el saco embrionario, donde se produce la fecundación.

Numerosos productos génicos se hallan implicados en la reproducción del olivo; entre ellos, las proteínas que desarrollan funciones clave en la biología del polen y que no son otras que las que desencadenan en humanos la alergia.

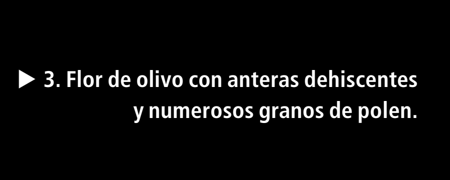


▲ 1. Olivos de la Sierra de Tramuntana, Mallorca.

BERNAT GASULL ROIG (*Sierra de Tramuntana*)

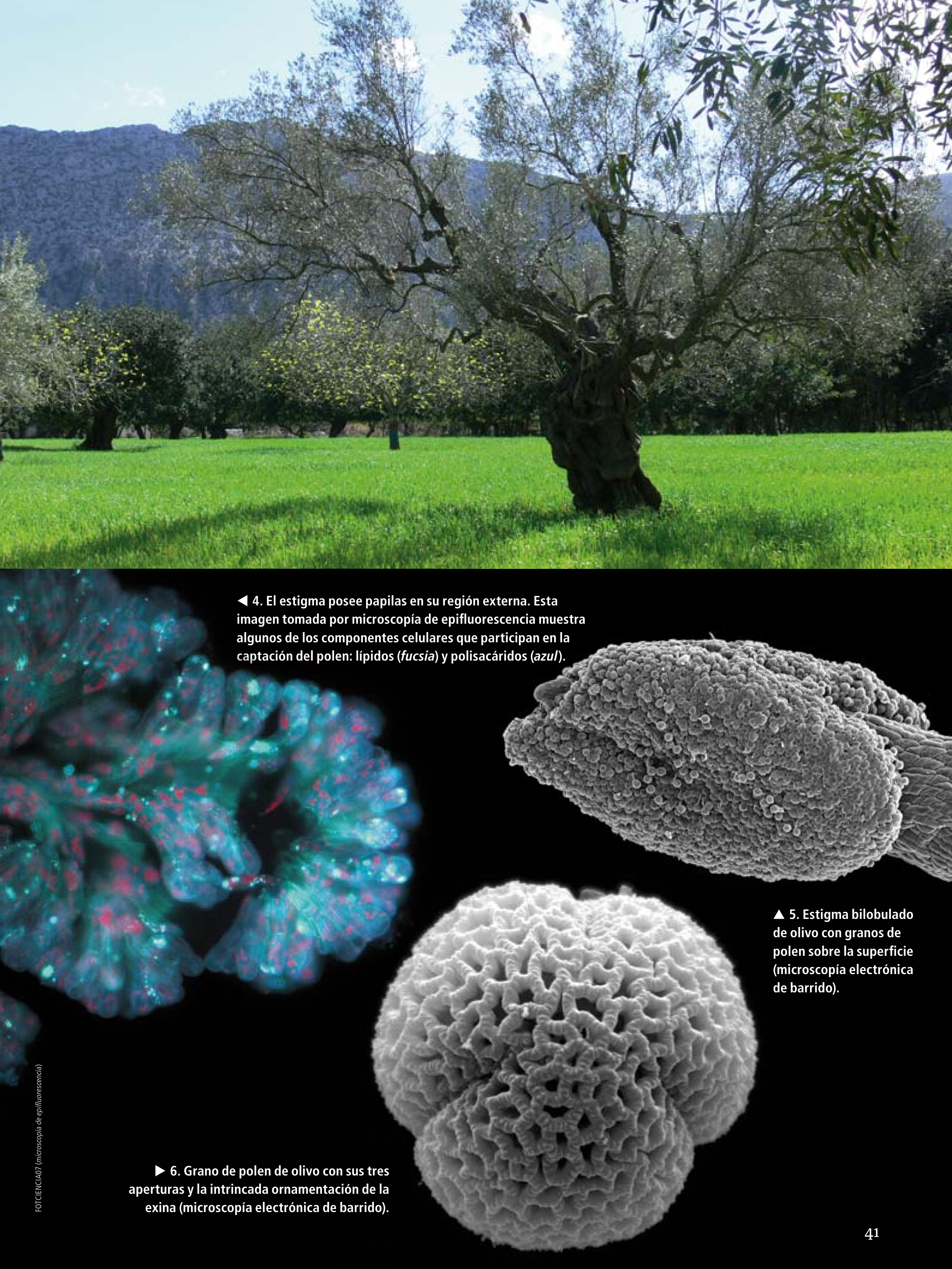


▲ 2. Ramas de olivo con inflorescencias o trama.





▶ 3. Flor de olivo con anteras dehiscentes y numerosos granos de polen.



◀ 4. El estigma posee papilas en su región externa. Esta imagen tomada por microscopía de epifluorescencia muestra algunos de los componentes celulares que participan en la captación del polen: lípidos (*fucsia*) y polisacáridos (*azul*).

▲ 5. Estigma bilobulado de olivo con granos de polen sobre la superficie (microscopía electrónica de barrido).

▶ 6. Grano de polen de olivo con sus tres aperturas y la intrincada ornamentación de la exina (microscopía electrónica de barrido).

FOTCIENCIA07 (*microscopía de epifluorescencia*)

George Sugihara: el caos y la pesca del día

En el mar hay menos peces que nunca. Según el matemático George Sugihara, la teoría de la complejidad sugiere un modo de revitalizar la pesca mundial contrario a la intuición

Paul Raeburn

Cuando George Sugihara topa con alguna noticia sobre la crisis financiera y los paquetes de ayuda gubernamentales, se le va el pensamiento a las sardinas, y más en concreto, a las sardinas de California.

No muchos años después de la Gran Depresión, la pesca de la sardina en California sufrió un declive igual de devastador. Los pescadores, que habían venido capturando con regularidad 500.000 toneladas anuales de sardinas durante los años treinta, pescaron menos de 5000 durante los peores años del decenio de los cincuenta y del de los sesenta. Aunque algunos agoreros habían presagiado los problemas, nadie había sido capaz de indicar exactamente cuándo ocurriría un desplome o cuán riguroso sería.

El colapso de la sardina dejó perplejos a los expertos de la pesca. Algunos echaron la culpa a la excesiva explotación. Otros lo achacaron a los vaivenes ambientales (cambios en los vientos dominantes o enfriamiento de la temperatura superficial del mar). Pero nadie pudo demostrar que su explicación diera en el clavo. El estado de California, pronto a evitar más trances parecidos, puso en marcha un sistema de seguimiento que ha ido recogiendo datos sobre las crías durante los últimos 50 años.



GARY PAYNE

GEORGE SUGIHARA

DA QUE PENSAR: a partir de la teoría de la complejidad, llega a la conclusión de que los procedimientos habituales de las flotas pesqueras dan lugar a poblaciones inestables que pueden crecer desmesuradamente o menguar incluso cuando el alimento abunda.

ESTAR PEZ: Devolver al agua los peces pequeños es justo lo que no hay que hacer para mantener pujantes los bancos de pesca, dice.

CONVIVIR CON EL CAOS: "La gestión de la pesca en gran medida parte de la idea de que esos sistemas son estables. Los relojes y los transistores sí funcionan así. Pero los ecosistemas, no".

Sugihara, matemático y ecólogo teórico de la Institución Scripps de Oceanografía de La Jolla (California), analizó esos datos y llegó a una sorprendente conclusión: ambas explicaciones eran erróneas.

La suya, publicada en *Nature* en 2006, es que el problema surge por pescar demasiados peces grandes. Los barcos de pesca dejaban tras de sí una población compuesta casi por entero de juveniles. Sugihara demostró la inestabilidad matemática de tales poblaciones. Un pequeño envite puede dar lugar a un gran auge o a una devastación catastrófica.

Imaginemos, dice Sugihara, un pez de 200 kilos en un acuario. Si lo alimentamos más, engordará; si le damos menos de comer, adelgazará. La población (un solo pez) es estable. Pero si ponemos mil peces de medio kilo en el acuario, una escasez de alimento hará que mueran por docenas, pues los más pequeños almacenan menos grasa corporal y no pueden soportar ni una carestía transitoria. La abundancia de sustento tampoco implica necesariamente que todos los peces grandes vayan a engordar; podría incitar a la reproducción y a un crecimiento desmesurado de la población, que a su vez podría agotar el suministro de pitanza y llevar a una nueva crisis. Es un sistema inestable. "He ahí el estado de los bancos de pesca, de la economía, de muchos sistemas naturales", afirma Sugihara. La historia reciente de la pesca de la sardina ilustra tales inestabilidades: los pescadores de la costa americana del Pacífico, de México a Canadá, capturan ahora un millón de toneladas de sardinas al año.

Pero esta inestabilidad no la entienden los que administran las pesquerías, insiste Sugihara. La ley dicta que gestionen la pesca para "un rendimiento máximo". La noción de que tal máximo exista implica que los peces crezcan a cierto ritmo de equilibrio y que las cap-

turas puedan ajustarse para cuadrar con esa tasa, obteniéndose así un rendimiento estable. Por el contrario, Sugihara concibe los bancos de pesca como un sistema complejo, caótico, similar a las redes financieras. Tan similares, que el gigante financiero mundial Deutsche Bank sedujo a Sugihara para que dejase las aulas durante un tiempo; y allí, de 1996 a 2001, utilizó con éxito las técnicas analíticas que más tarde volvería a emplear en su trabajo sobre las sardinas para realizar predicciones a corto plazo sobre las fluctuaciones del mercado.

Aunque pueda dar la impresión de que tanto los ecosistemas marinos como los mercados financieros sólo se rigen por el azar, no es así, explica Sugihara. Lo cual significa que se pueden realizar predicciones a corto plazo, al igual que ocurre con la meteorología. Robert M. May, de la Universidad de Oxford, llama a esa predecibilidad “la otra cara del caos”. May supervisó la tesis doctoral de Sugihara en la Universidad de Princeton cuando estuvo allí de profesor visitante, y sigue manteniendo la colaboración. “George fue uno de los primeros en apreciar en eso una manera de hacer predicciones”, dice.

Las investigaciones de Sugihara llegan en un momento de enorme preocupación por el futuro de la pesca mundial. Quizás el informe más alarmante apareció en 2006, cuando Boris Worm, ecólogo especializado en conservación marina de la Universidad de Dalhousie, publicó en *Science* que las capturas del 29 por ciento de las especies que se pescan actualmente habían descendido a menos del 10 por ciento de su máximo histórico. Si la tendencia continúa, afirmaba, en el 2048 se habrán agotado todos los bancos de pesca del mundo.

Otros piensan que el futuro no es tan sombrío. “Depende mucho de dónde estés”, dice Ray Hilborn, profesor de gestión de la pesca de la Universidad de Washington. Los Estados Unidos, Canadá y otros países desarrollados han restringido las capturas, y el futuro parece más halagüeño, dice. Pero Asia y Africa carecen de una gestión pesquera efectiva, e incluso los países europeos han fracasado a la hora de acordar un plan de gestión consistente. Los bancos de pesca en esas regiones corren un peligro mucho más grave, sostiene Hilborn.

Las implicaciones prácticas de los trabajos de Sugihara son claras. Las regulaciones actuales de pesca acostumbran incluir tamaños mínimos para proteger los peces pequeños. Justo la receta equivocada, aduce. “No son los peces pequeños, sino los grandes, los que deberían devolverse al agua”. Estabilizan la población y proporcionan una descendencia “mayor y de mejor calidad”. Experimentos de laboratorio con peces en cautividad corroboran sus conclusiones. En este sentido, David Conover, de la Universidad de Stony Brook, encontró que extrayendo durante más de cinco generaciones los individuos mayores de sus tanques, en los que criaba sardina atlántica, resultaba una población de individuos más pequeños.



JONATHAN S. BLAIR *National Geographic/Getty Images*

GANANCIA DE PESCADORES: La pesca de la sardina pasa por buenas y malas rachas. Devolver al mar los peces grandes puede contribuir a dominar un sistema complejo e inestable.

Sugihara ha demostrado también que las poblaciones de diferentes especies de peces están relacionadas. La mayor parte de las regulaciones contemplan aisladamente cada especie (sea sardina, salmón o pez espada). Pero la pesca, dice, es como la bolsa: la quiebra de una o dos especies, o de un fondo de inversión libre o de un banco de inversión, puede desencadenar un colapso catastrófico de todo el sistema.

Sugihara ha empleado su experiencia combinada en ecología y en finanzas para perfilar nuevas maneras de gestionar la pesca. Una de ellas es su idea de los créditos negociables de “capturas colaterales”. Las capturas colaterales son las tortugas, los tiburones y otros animales, que de vez en cuando caen por accidente en las redes. Según el plan de créditos negociables de capturas colaterales, a cada barco pesquero se le podría conceder un cierto número de créditos. Una vez consumidos éstos, tendrían que dejar de faenar o comprar más créditos en el mercado. Conforme aumentaran las capturas colaterales, el número de créditos a la venta descendería y su precio aumentaría. Los pesqueros dispondrían entonces de un incentivo para minimizar las capturas colaterales, puesto que sólo así podrían seguir pescando más tiempo.

El trabajo de Sugihara sobre las pesquerías no goza de aceptación universal. Roger Hewitt, director adjunto del Centro Científico de las Pesquerías del Sudoeste (encuadrado en la NOAA, la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera, de Estados Unidos), advierte de que el trabajo de Sugihara es “un poco desconcertante” para los que trabajan en la gestión de la pesca. “En las pesquerías, el enfoque habitual consiste en modelizar las poblaciones a partir de primeros principios. Sabemos a qué ritmo crece un pez, cuándo se reproduce, la edad a la que madura, cuántas crías tiene”, explica Hewitt. “El enfoque de George es totalmente diferente. Se fija en lo que ha pasado para ver si puede predecir el futuro”. Dicho de manera cruda, Sugihara se desentiende de tasas de crecimiento, de reproducción o de mortalidad.

Barry Gold, que dirige las tareas de conservación marítima en la Fundación Gordon y Betty Moore, en San Francisco, declara que los métodos analíticos de Sugihara tienen “su importancia para entender cómo se gestionan los bancos de pesca”. Pero piensa que los análisis de Sugihara necesitan una corroboración en el mundo real: “Hasta que no se pongan en práctica y veamos cómo responde la industria pesquera, no sabremos si funcionan”.

En parte como respuesta a las objeciones de Gold y de otros sobre la ausencia de pruebas de campo convincentes, Sugihara está negociando con grupos de la industria pesquera para aplicar sus ideas. “En cuanto se deja de pensar que el mundo funciona como un reloj, tan predecible, se pueden hacer pronósticos a corto plazo bastante buenos”, asegura. “Tengo mucha fe en el ingenio humano. Pero el primer paso es aceptar la realidad”.

¿Cómo un plan para salir de una adicción? “Sí”, responde, “algo así”.

La transformación de la industria automovilística

Sólo la colaboración entre los sectores público y privado puede ayudar a las "Tres Grandes" a incorporarse al futuro

Jeffrey D. Sachs

A la industria automovilística de EE.UU. se la ha vilipendiado en los últimos meses; la opinión pública se ha opuesto con firmeza a que reciban apoyo financiero del gobierno. La industria cayó en la trampa de los costes altos. Peor aún, las "Tres Grandes" (Chrysler, Ford y General Motors) han continuado promocionando los SUV o todoterreno, automóviles de alto consumo de combustible, cuando los riesgos para el clima y la seguridad energética de EE.UU. iban en aumento. Hasta cierto punto, la industria está también pagando el precio de la escalada del coste sanitario en Estados Unidos, que debería hallarse bajo un mejor control público, las inadecuadas políticas para la eficiencia energética y los bajos impuestos sobre la gasolina (en comparación con Europa y el Este asiático), que han facilitado la demanda de vehículos grandes por parte de los consumidores. Aun así, muchos de los problemas de la industria resultan, en efecto, de sus propios errores estratégicos de cálculo.

Sin embargo, en el menosprecio por la industria se olvidan cuatro puntos cruciales. Primero, un desplome de las Tres Grandes añadiría otra calamidad económica a una economía enturbiada por la crisis. Se perderían millones de puestos de trabajo en lugares con altas tasas de desempleo, sin creación de empleo compensatoria. Segundo, la difícil situación de los fabricantes de automóviles es resultado del desplome de todas las ventas de vehículos en Estados Unidos, más que de la disminución de la parte de los fabricantes nacionales en esas ventas. Las Tres Grandes no estarían al borde de la bancarrota si no fuera porque nos encontramos en la peor recesión desde la Gran Depresión. Tercero, las autoridades públicas y políticas tienen una inmensa corresponsabilidad junto con la industria por la insensata era de los SUV, al ignorar flagrantemente la seguridad energética, los riesgos climáticos y los préstamos personales insostenibles.

El cuarto punto, y el más crucial, es que el tránsito a automóviles de bajo consumo debe ser un esfuerzo público-privado. Un cambio tecnológico tan importante como es el paso de motores de combustión interna a vehículos eléctricos recargables en una red eléctrica limpia o con pilas de combustible de hidrógeno requiere una intervención masiva de políticas públicas y de financiación pública. La investigación y el desarrollo dependen de enormes desembolsos y buena parte del fruto de la I + D debería convertirse —y en todo caso se convertirá— en bienes públicos más que en propiedad intelectual privada. Por eso, durante un siglo el gobierno de EE.UU. ha practicado una financiación pública de la I + D en muchas industrias, entre ellas la aviación, los ordenadores, la telefonía, Internet, el desarrollo de medicamentos, el cultivo avanzado de plantas, los satélites y el GPS.

Lamentarse de que el Chevy Volt, híbrido enchufable de próxima aparición, tenga un precio durante el primer año de 40.000 dólares es no entender la cuestión. Inevitablemente, los costes de las primeras etapas de producción son muy superiores a los que se consiguen a largo plazo. Para ayudar a que se produzca esta transición, las políticas públicas deberían tomar algunas medidas; entre otras: la adquisición de los primeros modelos por parte de sectores públicos para las flotas de vehículos oficiales, impuestos especiales e incentivos de financiación para los primeros compradores, así como un aumento de los impuestos sobre la gasolina, que internalicen los costes del cambio climático y de la dependencia de importaciones de petróleo.

La financiación por EE.UU. de técnicas de energía sostenible, como las baterías de alto rendimiento, que son el factor limitante en los híbridos enchufables de alto rendimiento, ha sido baja


MATT COLLINS

desde que el presidente Ronald Reagan revirtiera las inversiones en energía comenzadas por el presidente Jimmy Carter. Según los datos de la Agencia Internacional de la Energía, el gasto federal norteamericano en I + D en los últimos años para todas las energías ascendió a sólo 3000 millones de dólares anuales aproximadamente, menos de lo que gasta el Pentágono en dos días. Este abandono está finalmente cambiando con la promesa de los préstamos por valor de 25.000 millones de dólares para mejoras tecnológicas aprobados por la ley de la energía de 2007, si bien ese dinero no ha sido movilizado aún y puede llegar demasiado tarde.

EE.UU. necesita una política tecnológica público-privada, no que se apunte con el dedo al sector privado. Los esfuerzos a gran escala por producir vehículos de pila de combustible en diez años requieren respaldo público, con I + D en tecnología básica, apoyo para ensayos y difusión en sus inicios, impuestos más altos sobre la gasolina, e inversiones públicas en técnicas complementarias, como una red eléctrica limpia para recargar los coches. Sería un error de proporciones históricas dejar morir a la industria en los umbrales de un cambio vital.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Investigación Científica

Revista de la Deutsche Forschungsgemeinschaft • Suplemento de 3/2008

Cooperación con Latinoamérica

Un continente se reinventa

Impulsados por la ciencia y la investigación, los estados latinoamericanos juegan un papel cada vez más importante en la competencia internacional por las innovaciones

Por Matthias Kleiner



Foto: Frenz

Una región brotante en investigación de la tierra se hace notar: Los logros alcanzados en los últimos años por Latinoamérica como continente y en especial por algunos países emergentes mediante actividades de investigación específicas, formación de profesionales y desarrollo de productos, ya no tienen que temer la comparación con Europa o Asia. Los países de Latinoamérica están escribiendo una asombrosa historia de éxitos, participando cada uno de diferente forma e intensidad, de acuerdo a sus posibilidades.

Brasil, como décima economía más grande del mundo, en la última década se ha convertido en líder mundial de la producción de aviones de pasajeros. Lufthansa pronto pondrá en funcionamiento los primeros aviones construídos en Brasil. Este país también está liderando la tecnología del bioetanol y de la prospección petrolera en el océano. En la lucha contra el SIDA Brasil también es considerado uno de los países más ejemplares.

El fomento sistemático de la investigación ha sido de vital importancia para alcanzar esta posición líder. Además, la tasa de crecimiento para cupos de estudios de postgrado es de un 7% anual, sobrepasando incluso las metas preestablecidas.

Chile a su vez tiene un programa de iniciativa de excelencia establecido hace diez años, y que ha impulsado al país y a sus investigadoras e investigadores jóvenes al frente de la competencia internacional. Respecto a la ejecución y evaluación de sus programas de excelencia, Chile tiene una mayor ventaja en experiencia que Alemania. Además, dentro de los próximos diez años, éste país va a invertir cerca de 6 mil millones de dólares en la formación de profesionales en el extranjero. Los recursos para financiar estas iniciativas provienen de las ganancias generadas por la minería del cobre, molibdeno y litio.

Colombia dispone, desde el año 2006, de una iniciativa de excelencia que permitirá la formación de nuevas redes de investigación. En el año 2007 el presupuesto para el Consejo Superior de Investigaciones Científicas casi ha sido duplicado.

Argentina, Costa Rica y México por su parte consideran a la investigación y la tecnología como pilar central de su política de innovación. El gobierno argentino amplió la, hasta ahora, Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, convirtiéndola en Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.

La cooperación estratégica de la DFG en Latinoamérica se centra especialmente en los países que por un lado ya tienen numerosas cooperaciones con científicos alemanes y por otro lado prometen tener un alto poten-

En esta edición:

cial de desarrollo en el área de la investigación. Por estos motivos la DFG trabaja estrechamente con las organizaciones de fomento de la investigación en Argentina y Brasil, Chile y Costa Rica, así como Colombia y México, que conjuntamente apoyan proyectos mutuos mediante diversos programas de fomento (ver "Organizaciones homólogas en Latinoamérica", pág. 8).

Durante los últimos años las inversiones en investigación y desarrollo han crecido notablemente en los países latinoamericanos. Paralelamente ha aumentado el interés en la cooperación, esto se debe en gran parte a la labor de asesoramiento de las científicas y los científicos de confianza de la DFG en Brasil y Chile (ver "Representación Local", pág. 5).



Foto: Schneider

Ilustre marco para la cooperación científica: La Canciller Federal Alemana Angela Merkel y el Presidente de Brasil Luiz Inácio Lula da Silva firman en mayo de 2008 un acuerdo para la creación de la Iniciativa de Colaboración en Investigación BRAGECRIM.

Desde el año 2005 se pudieron realizar, ampliar o modernizar algunos acuerdos con organizaciones latinoamericanas. Estos acuerdos posibilitan el fomento conjunto de proyectos en diversos programas - desde los programas de movilidad hasta la financiación de proyectos y las iniciativas coordinadas como los colegios doctorales.

Para la cooperación con países en vías de desarrollo existe la posibilidad, en casos excepcionales, es decir de gran interés para la ciencia alemana, y a falta de financiación por la contraparte, del apoyo financiero para el científico extranjero por parte de la DFG. Un ejemplo actual de un caso así es el grupo de investigación de la DFG "Biodiversidad y Manejo Sustentable de un Ecosistema Megadiverso en el Sur de Ecuador".

Especialmente atractivos para la cooperación germano-latinoamericana son los colegios doctorales internacionales, ya que posibilitan la formación de doctorandos estructurada y transfronteriza. Por una parte se facilita a estudiantes de doctorado alemanes el acceso a excelentes centros de investigación latinoamericanos y por otra parte se contrarresta la falta de científicos jóvenes que existe en algunas regiones y disciplinas en Latinoamérica. La formación de estos candidatos se realiza preferentemente en el marco de proyectos de investigación internacionales con fases de intercambio integradas. Dado que los candidatos de colegios doctorales permanecen en el extranjero tan solo de tres a seis meses, se evita la emigración de potenciales investigadores, respetando los intereses de ambas partes.

Conjuntamente con tres organizaciones brasileñas, la DFG, a partir de este año, fomenta el proyecto conjunto brasileño-alemán para la tecnología de la producción BRAGECRIM ("Bastante más que una buena idea", pág. 3).

Junto con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), la DFG fomentó, en el año 2008, un total de 15 talleres temáticos en áreas de investigación como la biodiversidad, las ciencias del medioambiente y las ciencias de los materiales o tecnología de procesos. Como resultado de estos talleres, en el año 2009, los grupos de investigación mexicano-alemanes presentarán propuestas para proyectos a fin de recibir financiamiento p.e. para personal, equipamiento e insumos, al igual que para propuestas paquete, grupos de investigación y colegios doctorales como resultados de la preparación en estos talleres.

Las cooperaciones europeo-latinoamericanas y, sobre todo, las germano-latinoamericanas en ciencia y tecnología tienen una larga tradición. La competitividad de algunos países latinoamericanos, especialmente de Brasil y Chile, ha mejorado ostensiblemente gracias al fomento definido y duradero de la investigación de excelencia.

Internamente Latinoamérica, como área científica, también está comenzando a estrecharse. Esta región científica en el futuro unirá sus fuerzas con más eficacia. Hacia fuera la cooperación con Estados Unidos y Europa, que hasta hace aproximadamente diez años aún era dominante, está cediendo a una competencia global dentro de la cual se destacan más y más los países asiáticos como socios de cooperación. Impulsada por un dinámico interés de cooperación, en el futuro la DFG seguirá ampliando su posición como importante socio de fomento dentro de la creciente competencia global, conjuntamente con las organizaciones homólogas en Latinoamérica.

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kleiner, Presidente de la DFG

Bastante más que una buena idea

Innovación en tecnología de producción:
nuevo convenio con Brasil para fomentar la investigación científica

De camino a ser una nación industrializada: En los últimos años, Brasil, que, con unos 8.500.000 kilómetros cuadrados, es el país más grande de Latinoamérica y el quinto país más grande del mundo, ha sufrido transformaciones fundamentales. Actualmente muchas empresas brasileñas, como por ejemplo WEG (motores), Embraco (compresores) y EMBRAER (aviones), operan globalmente y pertenecen a los líderes tecnológicos en su área.

Paralelamente, muchas empresas alemanas que en parte ya operan en Brasil hace muchos años y alli producen principalmente para el mercado sudamericano, han fortalecido su compromiso. En el área de São Paulo hay cerca de 1200 compañías alemanas, lo que constituye la mayor concentración de empresas industriales alemanas fuera de Alemania. Pero también en otros estados - desde el Amazonas en el norte hasta Rio Grande do Sul en el sur -, se han instalado empresas alemanas. Muchas de ellas también han incrementado en Brasil sus actividades de investigación y desarrollo. Un ejemplo para este auge es el Volkswagen Fox, que fue desarrollado en su totalidad por Volkswagen en Brasil. Este automóvil es producido actualmente en Brasil y Argentina desde donde es exportado a muchos otros países, incluyendo países europeos.

Existe una gran demanda por productos innovadores. La producción es influenciada por una globalización que avanza a pasos gigantescos. La creciente competencia entre los distintos países presiona a las empresas a innovar y las obliga a mejorar sus procesos de producción y a continuar con la automatización. Para poder cumplir con esta tarea se hace imprescindible una visión global del desarrollo y la planificación de la producción.

El desafío está en desarrollar rápidamente, partiendo de nuevas ideas, productos adaptados al mercado y a los consumidores. Esto no sólo se refiere a las empresas, sino también a los centros de investigación que cooperan con ellas, ya que todavía más del 70% de las innovaciones fracasa durante la etapa de desarrollo y aplicación. Por lo tanto es necesaria una nueva concientización: Las innovaciones son bastante más que una buena idea!

BRAGECRIM – Brazilian German Collaborative Research Initiative in Manufacturing Technology – es fruto de numerosas cooperaciones de larga data entre institutos de investigación alemanes y brasileños. Con el nuevo convenio, investigadoras e investigadores de ambos países podrán trabajar juntos de forma más intensiva en el área de tecnología de la producción. BRAGECRIM se concentra en "Investigación en innovaciones para el mañana" y es financiado por la DFG y tres organizaciones brasileñas con sus primeros proyectos.

Esta línea de investigación, interesada en la creación de valores sustentables, estudia el ciclo de producción completo. Ello incluye numerosos aspectos, que van desde la exploración de materias primas, desarrollo y confección de los productos, hasta la logística, la distribución y la utilización de los productos. En estas áreas ambos países poseen grandes fortalezas, pero a su vez hay una gran necesidad de reducción de brechas.

Tanto a nivel básico como a nivel de transferencia y aplicación las actividades de investigación deben ser desarrolladas conjuntamente con las empresas industriales y deben complementarse mutuamente. Para lograrlo BRAGECRIM reúne, además de las cuatro organizaciones de fomento a la investigación ya involucradas, a investigadores de excelencia de ambos lados del Atlántico. Ambos países quieren unir sus innovaciones, haciendo participar no menos de 30 institutos de investigación pertenecientes a universidades, junto con Institutos Fraunhofer, en la investigación de temas relacionados con la creación de valores sustentables en la tecnología de la producción.


Foto: EMBRAER

Construcción de aviones en Brasil: en un lapso de pocos años el país se convirtió en líder mundial en esta área.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Tilo Pfeifer, Dr.-Ing. Reinhard Freudenberg, Werkzeugmaschinenlabor, RWTH Aachen

Agua labrada en roca

México: Lo que rocas calcáreas del cretáceo revelan sobre el "ecosistema mar"

Interminable se extiende el camino de tierra. Dejamos a la pequeña ciudad de Muzquiz a unos 100 km detrás de nosotros. El camino por el norte del estado mexicano de Coahuila atraviesa una zona semiárida impresionante y pasa junto a las cordilleras boscosas del Parque Nacional Boquillas del Carmen hacia el norte, rumbo a la frontera con Texas. "¡Cerrar las ventanas!" decimos cuando nos encontramos con caravanas de camiones cargados con espato y nuestro equipo se ve envuelto en nubes de polvo.

Nuestro destino son canteras donde se extraen delgadas láminas de piedra caliza. Finalmente aparecen en el horizonte: interminables canteras a lo largo de las laderas de los cerros. La piedra caliza extraída se utiliza para fabricar baldosas y láminas para pisos y luego se transporta hasta las metrópolis Monterrey y Saltillo en el sur o cruzando la frontera con Estados Unidos hacia el norte hasta San Antonio. Las quebradizas capas intermedias son desechadas. Para geólogos no obstante, cada capa de piedra caliza representa una página en el libro del cretáceo.



Fotos: Stinnesbeck

En la tierra de nadie: Láminas de piedra caliza en la frontera entre México y Texas

Las láminas de piedra caliza en la tierra de nadie entre México y Texas guardan un secreto: en ellas se han conservado restos fósiles de seres vivos del cretáceo. Las duras conchas de los moluscos y los huesos de los vertebrados así como impresiones de aletas, escamas o contenidos estomacales abren una vista única hacia la vida marina del noreste de México durante el cretáceo. La conservación de partes blandas es una rareza a nivel mundial. Estas valiosas joyas paleontológicas merecen especial atención, ya que no sólo revelan causas de muerte, sino también dan indicios sobre la vida en el pasado.

La gigantesca zona de canteras en el norte de Muzquiz es una meca paleontológica. Aquí se encuentran por sobre todo amonitas, moluscos, peces y cangrejos. También fueron descubiertos los restos de un mosasaurio, un lagarto marino cercano a las iguanas, de aproximadamente cinco metros de largo. De la pared de la oficina de un ingeniero en minas extrajimos un fósil especial: un dinosaurio volador conservado casi en su totalidad con partes de la membrana de sus alas. Se trata del primer nyctosaurio de México y del nyctosaurio más antiguo conocido hasta la fecha. Ha recibido el nombre de "Muzquizopteryx coahuilensis" en honor a la ciudad de Muzquiz y del Estado de Coahuila.

En otras canteras de piedra caliza al norte de Monterrey, la capital del Estado de Nuevo León, se han encontrado, junto con muchos otros fósiles, restos de tortugas marinas, dinosaurios marinos como los aigialosaurios y mosasaurios primitivos. Algunos se conservaron con sus escamas y el estómago lleno, contándonos la historia de su existencia. La presencia de ambos reptiles en un solo sitio es un hecho único a nivel mundial. En los últimos seis años se han encontrado y registrado numerosos fósiles en un área de más de 15.000 kilómetros cuadrados en el noreste de México y aún no hay final a la vista.

Hace aproximadamente 90 millones de años se formó una capa blanda de lodo calcáreo en el fondo del primitivo golfo de México, en la intersección del Mar de Tetis, el mar interior occidental, y del Pacífico. A través de millones de años, la presión sobre el fangoso fondo marino fue formando delgadas capas de cal, quedando en ellas los restos de animales y las conchas de amonitas y moluscos.

Durante millones de años se formó una capa de sedimentos de varios centenares de metros de espesor, producto de la alternancia entre la acumulación de lodo calcáreo en el fondo marino y el simultáneo hundimiento de éste. Actualmente estas capas forman las cadenas montañosas de la Sierra Madre Oriental y del altiplano en México. Los fósiles sólo se pudieron conservar porque en el fondo del mar del cretácico superior no habían corrientes, por lo que el agua cercana al fondo marino estaba prácticamente libre de oxígeno. En el inhóspito ambiente del fondo marino vivían por esta razón sólo inoceramos,

unos moluscos extraños, que evidentemente eran muy resistentes. Animales de presa y carroñeros evitaban esta zona mortal. La falta de oxígeno hizo más lento el proceso de descomposición de los cadáveres. Lentamente sus huesos y partes blandas fueron reemplazados por minerales disueltos en el agua, especialmente fosfato de calcio. En el fino lodo calcáreo no sólo quedaron excelentemente conservados los huesos, sino también las estructuras de las aletas, escamas, branquias e incluso restos de músculo.

Estas gigantescas zonas de piedra caliza se formaron en el mar abierto y probablemente son consecuencia de un extenso, e incluso quizás global, derrumbe del sistema de corrientes oceánicas. El plancton proliferó, producto de temperaturas del agua que sobrepasaban en más de diez grados Celcius a las actuales. Recurrentemente morían estos microorganismos en masa y convertían las áreas del océano, bañadas por el sol, en un caldo mal oliente. El plancton muerto sedimentaba en el fondo marino y se pudría ahí, siendo el oxígeno liberado consumido por bacterias.

Debido a que estaban ausentes las corrientes profundas, el agua no se mezclaba y se formaban enormes zonas muertas, en las que moría prácticamente cualquier ser viviente. En el golfo de México y en otros lugares se forman aún hoy en día frecuentemente zonas muertas parecidas, con concentraciones de oxígeno extremadamente bajas. Los desencadenantes son principalmente las aguas tibias y las proliferaciones de plancton, igual que hace 90 millones de años. Nos planteamos esta pregunta: ¿encontrarán los paleontólogos del futuro abundantes y reveladores fósiles como lo hacen los equipos de investigadores en el actual noreste de México?



Para los geólogos cada capa de piedra caliza es una página de la vitácora del cretáceo.

Prof. Dr. Wolfgang Stinnesbeck, Geowissenschaftliches Institut der Universität Heidelberg, **PD Dr. Eberhard Frey**, Staatliches Museum für Naturkunde Karlsruhe

Representación local

Investigadores de confianza en Latinoamérica

Desde mediados de 2006 la DFG trabaja con investigadores e investigadoras de confianza en Brasil y Chile. Éstos se conectan sistemáticamente con los centros de investigación más importantes y con las organizaciones homólogas en dichos países. Los investigadores de confianza informan sobre las actividades de fomento de la DFG y apoyan a la DFG en la identificación de los grupos de investigación y científicos de excelencia. Además son los representantes y contactos locales de la DFG. Las páginas web de la DFG tanto en portugués como en español informan puntualmente sobre programas de fomento y concursos, además de temas de la actualidad.

Debido a las sobresalientes experiencias que se han obtenido con la representación local de la DFG a través de los investigadores de confianza en Brasil y Chile, este modelo se aplicará en el futuro también en México, Argentina y Colombia.

Chile:

Profa. Dra. Gudrun Kausel (Representante de la DFG en Chile), Instituto de Bioquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile
Casilla 567, Valdivia
Tel.: +56 63 221798, 081377852
Fax: +56 63 221107
E-Mail: gkausel@uach.cl
▶ www.gkausel.cl/dfg

Brasil:

Prof. Dr. Helmut Galle (Representante Académico de la DFG en el Sur-Sudeste de Brasil), Departamento de Letras Modernas, FFLCH, Universidade de São Paulo
Rua Teodoro Sampaio 1.020, Conj. 1.107, Pinheiros,
05406-050 São Paulo – SP, Brasil
Tel.: +55 11 3062-2717
Fax: +55 11 3088-9514
Celular: +55 11 8336-7579
E-Mail: helmut_galle@hotmail.com
▶ www.dfg-br.com

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Representante Académico de la DFG en el Centro-Oeste, Norte y Nordeste de Brasil), Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias
Campus do Pici, Bloco 804
60451-070 Fortaleza – CE, Brasil
Tel.: +55 85 3366-9774
Fax: +55 85 3366-9775
E-Mail: jcaraujo@ufc.br

Centro del saber

En el estado de São Paulo está reunida la elite universitaria y científica de Brasil

El estado de São Paulo, con 40 millones de habitantes, no sólo es la región más poblada y con mayor importancia económica de Brasil, sino que también concentra la ciencia y la tecnología del país. La metrópolis científica es sede de varias universidades: junto a las tres universidades financiadas por el estado hay una subvencionada por el estado federado y varios cientos de universidades privadas.

La Universidade de São Paulo (USP) es la más grande y de mayor importancia del país. Fue fundada en 1934 y dispone actualmente de 37 instalaciones para docencia e investigación, siete institutos especiales, cuatro museos y cuatro hospitales. De los 80.589 estudiantes inscritos en el 2006, 48.589 se encontraban en proceso de graduación, mientras que 25.007 formaban parte de programas de master y doctorado. La USP posee la mayor cantidad de programas de postgrado altamente evaluados.

La Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), con 30.000 estudiantes, fue fundada en 1966 en la ciudad de Campinas. A ella pertenecen exitosos centros de investigación de todas las ciencias humanas, naturales y de la ingeniería. Alrededor de un 15% de todos los proyectos de investigación en Brasil son de la UNICAMP. La tercera universidad del estado es la Universidade Estadual Paulista (UNESP), que tiene sucursales en 23 ciudades del interior del país. En sus 32 facultades e institutos se encuentran inscritos alrededor de 43.000 estudiantes.

La Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) fue fundada en 1933 como universidad de medicina, lo que hasta hoy sigue siendo su disciplina principal. Actualmente tiene aproximadamente 17.000 estudiantes. La Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP), con sus 32 carreras de graduación, 26 programas de master y 16 de doctorado, es una de las universidades privadas más grandes de São Paulo.

En São Paulo, además de las universidades, hay numerosos centros de investigación. Por ejemplo, en São José dos Campos, un centro industrial del estado, se encuentra el Instituto Nacional del Aire y el Espacio (INPE), que alberga proyectos de investigación tanto nacionales como internacionales. La investigación en São Paulo no sólo es financiada por las instituciones de fomento del estado, sino también por la fundación para el fomento de la investigación del estado federal (FAPESP). El año 2006 fué asignado un total de 153,5 millones de dólares a proyectos de investigación y becas.

Prof. Dr. Helmut Galle, Universidade de São Paulo

Cooperación con tradición y perspectivas de futuro

Entrevista con el Embajador de Chile en Alemania, Prof. Dr. Álvaro Rojas

***forschung:** Desde 1999 Chile ha fomentado mediante varios programas la creación de centros de excelencia. ¿Cuáles son las características y objetivos de este fomento a la excelencia y cuáles podrían ser de relevancia respecto a las iniciativas de excelencia que tenemos en Alemania?*



Foto: Embajador de Chile en Alemania

Álvaro Rojas: La fundación de centros de excelencia en Chile está orientada a concentrar ciertos ámbitos temáticos en diferentes centros universitarios y no universitarios y asegurar la mayor inversión pública posible a estos centros. La calidad científica de estos centros juega un papel fundamental a la hora de la asignación de fondos y la evaluación. A través de un aumento del presupuesto de CONICYT y del Ministerio de Educación se posibilitó el financiamiento de estos centros de excelencia con becas y fondos para la investigación y los respectivos equipamientos. Los programas Fondap, Milenio y Financiamiento Basal son, entre otros programas, las principales columnas que soportan este fomento. De gran importancia es asimismo la existencia de contactos con investigadores internacionales que trabajan en centros similares en el extranjero. De esta forma todos los centros de excelencia en Chile cooperan con socios internacionales.

¿Qué oportunidades ofrecen los centros de excelencia a los jóvenes científicos chilenos?

Las posibilidades de hacer una carrera científica pueden mejorar considerablemente mediante la labor de investigación en un centro de excelencia. Esto es particularmente el caso cuando este centro coopera con instituciones en el extranjero, como por ejemplo los Cluster de Excelencia o los colegios doctorales en Alemania.

En el marco del programa Bicentenario de Capital Humano (BCH), está previsto apoyar hasta el año 2017 miles de futuros investigadores con una suma de 6 mil millones de dólares. ¿Qué efectos espera Ud. generarán estas iniciativas en la cooperación internacional y en particular entre Chile y Alemania?

En comparación con otros países de la OCDE de similar desarrollo, Chile produce un número menor de egresados de programas de postgrado. En el marco del programa BCH, Chile aumentará el número de becas de postgrado a todo el mundo. El programa abarcará más de 6.500 becarios de programas de doctorado y master y por lo menos 3.000 becarios de Universidades de Ciencias Aplicadas. Alemania es un país que nos ha apoyado decididamente desde hace décadas en la educación y capacitación de científicos jóvenes en ciencia y tecnología.

¿Cómo se financiará este ambicioso programa?

La favorable situación de los precios de algunas materias primas de la minería metálica y no metálica han posibilitado la creación de reservas para el desarrollo futuro de las cuales se financiará el programa BCH.

¿En qué sectores de la ciencia advierte Ud. potenciales especialmente grandes para la cooperación entre Chile y Alemania?

El potencial es particularmente alto en la minería, en la tecnología de información y en la tecnología alimenticia. Pero también cabe mencionar a la administración, seguridad pública, energía, salud, medio ambiente, biotecnología y turismo.

En resumen, ¿cómo evalúa Ud. la cooperación chileno-alemana en la investigación? ¿Qué potencial prevee Ud. para el futuro?

Alemania ha sido desde muy temprano en la historia de nuestro país un colaborador científico y académico y jugó un papel particularmente importante desde 1870 en la construcción de nuestro sistema de educación superior, de la ciencia y de la tecnología. Alemania debería continuar con su cooperación en un mundo globalizado debido a que es un socio muy importante para Chile en muchas áreas de la ciencia. La DFG ha aportado considerablemente al refuerzo de la cooperación científica y a la creación de redes entre científicos chilenos y alemanes. Estas redes hoy día adquieren cada vez más importancia. El científico moderno no es el investigador solitario que no abandona su laboratorio. Hoy día, los contactos, las estancias de investigación en el exterior y el intercambio de opiniones son importantes motores para el progreso de la ciencia. Aquí, la DFG y otras instituciones alemanas como la Alexander von Humboldt Stiftung y el DAAD juegan un papel decisivo.

Profundizando

Geociencias en Chile

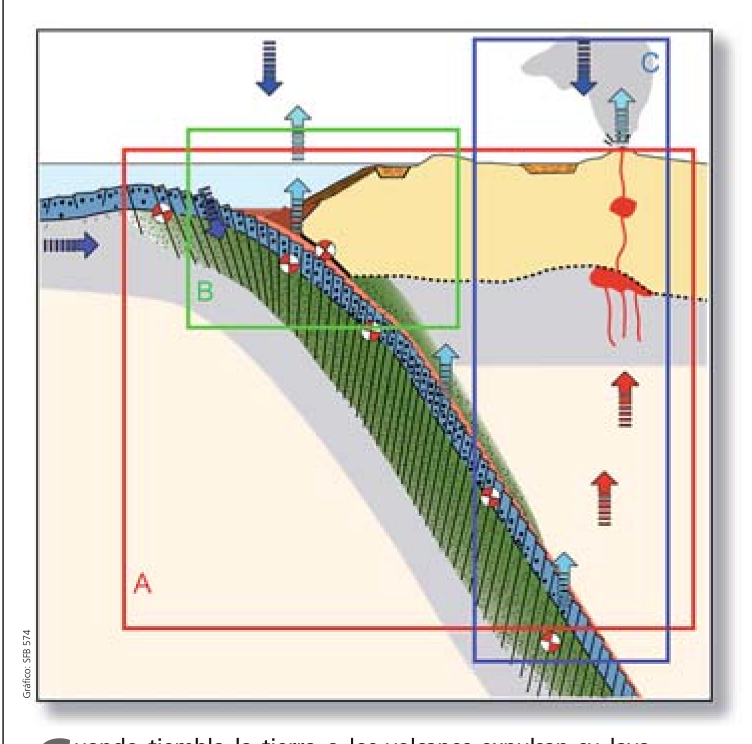


Gráfico: SFB 574

Cuando tiembla la tierra o los volcanes expulsan su lava incandescente, ellas son frecuentemente la causa: las zonas de subducción son componentes centrales en el constante y complejo intercambio de materiales entre el centro de la tierra y la superficie. En ellas chocan las placas tectónicas, hundiéndose la pesada placa oceánica bajo la placa superficial más liviana, que puede ser oceánica o continental. Este intercambio, producido por el movimiento de las placas tectónicas, controla las condiciones de vida sobre la tierra, las que cambian dramáticamente durante las eras geológicas y tienen por lo tanto influencia sobre el clima. El SBF 574 "Volátiles y fluidos en zonas de subducción: efectos en el clima y mecanismos que provocan catástrofes naturales" financiado por la DFG estudia los compuestos volátiles en las zonas de subducción, que son compuestos que salen a la superficie terrestre en forma líquida o gaseosa. Desde finales del 2007 la sede principal de este proyecto se encuentra en Chile central.

En las tres áreas se estudian la "Estructura y tectónica de zonas de subducción" (marco rojo A en la ilustración), "Registro de subducción, procesos de reacción y tasas de emanación de volátiles en la pendiente continental" (marco B) y "Transferencia de volátiles desde la placa a la atmósfera a través de los volcanes" (marco C). El proceso, estudiado en conjunto con numerosos científicos chilenos, se puede describir de la siguiente forma: junto con la quebradiza placa en hundimiento se transportan volátiles a las profundidades, los cuales se liberan nuevamente ante un aumento de temperatura y presión (flechas celestes). En la capa terrestre que está sobre estas zonas se forman áreas blandas, que emergen en forma de volcanes (flechas rojas). Finalmente se emiten volátiles en la pendiente continental submarina hacia el océano y en el cordón de volcanes hacia la atmósfera.

Prof. Dr. Kaj Hoernle, IFM Geomar, Universität Kiel

▸ www.sfb574.ifm-geomar.de/php/goto/Home/index.php

Organizaciones homólogas de la DFG en Latinoamérica

Argentina:
CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
▶ www.conicet.gov.ar

Brasilien:
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
(Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior)
▶ www.capes.gov.br

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
(Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico)
▶ www.cnpq.br

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos – The Brazilian Innovation Agency
(Financiadora de Estudios y Proyectos)
▶ www.finep.gov.br

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
(Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de São Paulo)
▶ www.fapesp.br

Chile:
CONICYT – Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
▶ www.conicyt.cl

Costa Rica:
Universidad de Costa Rica – Vicerrectoria de Investigación
▶ www.ucr.ac.cr

Colombia:
COLCIENCIAS – Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología
▶ www.colciencias.gov.co

México:
CONACYT – Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
▶ www.conacyt.mx


Foto: Frey

Este fósil extraordinario recibió, debido a sus abultados huesos craneanos, el sobrenombre de “Cupacabras”. Se trataba de un pez de rapiña del grupo Pachyrhizodontidae (pez con dientes de raíz gruesa). Estos rapaces del océano, de hasta tres metros de largo, efectivamente necesitaban dientes de raíces fuertes, dado que devoraban todo lo que apareciera ante su boca y cupiera entre sus fuertes mandíbulas. Este pez rapaz hacía inseguro el golfo de México durante el cretáceo superior, hace unos 90 millones de años. Científicos encontraron este fósil en una cantera cercana a la pequeña ciudad de Vallecillo en el noreste de México.

Contacto

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Dr. Dietrich Halm, Director “Latinoamérica, Caribe y la Cooperación con los Países en Vías de Desarrollo” dentro del grupo “Cooperación Internacional”
Tel.: +49 228 885-2490
E-Mail: Dietrich.Halm@dfg.de
▶ www.dfg.de/internationales
▶ Download: www.dfg.de/en/german_research/index.html

Pie de Imprenta

Suplemento de la Revista “forschung”, Edición 3/2008
Editado por la Fundación Alemana para la Investigación Científica (DFG)
Dirección editorial: DFG, Depto. de Prensa y Relaciones Públicas, Kennedyallee 40, 53175 Bonn, Tel.: +49 228 885-1, E-Mail: postmaster@dfg.de, ▶ www.dfg.de
Redactor jefe: Marco Finetti; Redacción: Dr. Rembert Unterstell; Cooperación redaccional: Dr. Peggy Freede; Lectorado: Stephanie Henseler, Angela Kügler-Seifert
Imprenta: Bonner Universitätsbuchdruckerei (BUB)

Líquidos y hielos de espín

En ciertas redes cristalinas, las energías de interacción entre imanes atómicos o moleculares no pueden ser todas mínimas a la vez. Esta "frustración" origina propiedades insólitas, que los físicos tratan de comprobar en materiales reales. Con algunos éxitos.

Rafik Ballou y Claudine Lacroix

CONCEPTOS BASICOS

- Se han descubierto nuevos sistemas magnéticos en los que se produce una "frustración" de interacciones entre los constituyentes. Por su analogía geométrica con los fluidos y la red cristalina del hielo de agua, estos sistemas se denominan "líquidos" y "hielos de espín".
- Las propiedades originales de los sistemas frustrados obligan a los físicos teóricos a reformular ciertas nociones termodinámicas fundamentales. Los experimentalistas han hallado frustración de espines en numerosos compuestos de tierras raras.
- El interés de este fenómeno no se ciñe al magnetismo. Los materiales frustrados exhiben propiedades magnetotérmicas que podrían desembocar en aplicaciones prácticas en el campo de la refrigeración magnética.

Aunque la humanidad viene observando fenómenos magnéticos desde hace milenios, durante largo tiempo la comprensión y las aplicaciones del magnetismo no pasaron de rudimentarias. La riqueza de estos fenómenos no fue apreciada hasta los siglos XIX y XX, merced al descubrimiento, estudio y explotación de materiales y comportamientos magnéticos diversos, desarrollos parejos con los progresos logrados en la síntesis de nuevos materiales.

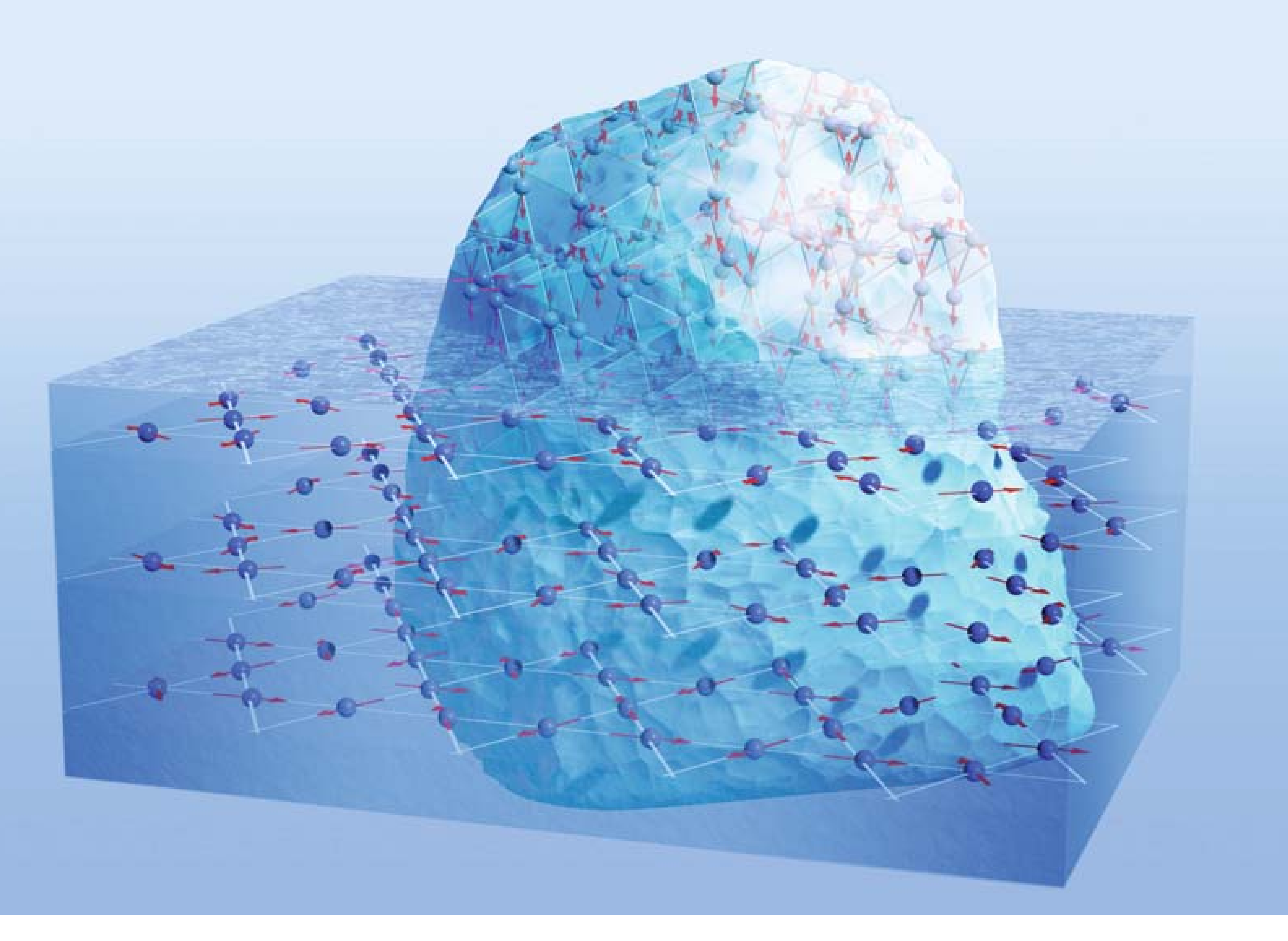
Para comprender el magnetismo de la materia, los físicos han ideado en el decurso de los últimos decenios conceptos y técnicas aplicables a numerosas cuestiones de carácter más universal; entre ellas, el estudio de los cambios de estado de la materia y el estudio de sistemas de N cuerpos en interacción.

La exploración del magnetismo se ha revelado fructífera en numerosos aspectos. Pero no está completa. Se han descubierto en fecha reciente nuevos sistemas magnéticos en los que interviene una "frustración" de interacciones entre los elementos magnéticos (microscópicos) constituyentes. Denominados "líquidos" y "hielos de espín" (*véase la figura 1*) por razones que se expondrán más adelante, estos sistemas exhiben propiedades originales, que obligan a los físicos teóricos a formular con mayor precisión ciertas nociones fundamentales, como el tercer principio de la termodinámica. Los experimentalistas, por su parte, se esfuerzan en poner de manifiesto, en materiales reales, tales propiedades. Y como la noción de frustración se presenta en otras situaciones (en apilamientos de átomos o en los cristales líquidos) su interés no se ciñe al magnetismo.

Para ahondar en los líquidos y hielos de espín, comencemos por recordar los fundamentos microscópicos del magnetismo. Ello nos permitirá explicar en qué consiste la frustración. Veremos que, en función de la geometría de la red de elementos magnéticos de un material, la frustración lleva a propiedades magnéticas originales. Daremos algunos ejemplos de materiales en los que podrían intervenir dichas propiedades.

Las propiedades magnéticas de la materia resultan de las propiedades de sus elementos constituyentes (átomos y moléculas), objetos constituidos a su vez por otras partículas (electrones, protones y neutrones), dotadas de características magnéticas. La función principal está asignada a los electrones o, mejor, a los cortejos que éstos forman en torno a los núcleos atómicos. El magnetismo nuclear, debido a los núcleos atómicos, es de intensidad mucho más débil.

Cada electrón posee un momento cinético intrínseco, el espín, una magnitud cuántica que le confiere un momento magnético. El electrón constituye, por así decirlo, una suerte de imán elemental. Los espines de los electrones y los momentos cinéticos asociados a su movimiento orbital se combinan en los átomos y las moléculas atendiendo a reglas complejas,



1. LIQUIDOS O HIELOS DE ESPIN es la denominación que reciben las fases magnéticas susceptibles de establecerse en redes cristalinas integradas por átomos o moléculas dotados de momento magnético, o "espín", cuya disposición geométrica es tal, que los espines no pueden quedar orientados de forma que minimicen, a la vez, la energía de interacción de todos los pares de espines vecinos. Esta frustración de interacciones da lugar en ciertos casos a "líquidos de espín", en los que, para una misma energía mínima total, existe una infinidad de configuraciones posibles (caso de la red plana "kagomé", de interacciones antiferromagnéticas, ilustrada aquí con tres configuraciones planas que poseen la misma energía mínima). La frustración puede dar lugar también a un "hielo de espín"; aquí, las orientaciones de los espines describen una estructura equivalente a una de las formas del hielo (caso de la red "pirocloro", compuesta por tetraedros con interacciones ferromagnéticas).

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON DE DIDIER FLORENTZ/*Pour la Science*

y engendran un espín total. Si este espín resultante es distinto de cero, el átomo o molécula en cuestión posee un momento magnético no nulo. Los expertos en magnetismo prefieren el término "espín" a la expresión "momento magnético". Nosotros también.

Espines: paralelos o antiparalelos

Los espines atómicos interactúan entre sí y con campos magnéticos exteriores; de ello resultan las propiedades magnéticas de cada material. En las sustancias ferromagnéticas, la energía de interacción de un par de espines vecinos es mínima cuando ambos apuntan en la misma dirección y sentido. Se habla en tal caso de espines paralelos. Dado que todo sistema físico tiende a ocupar un estado de energía mínima, si la temperatura es suficientemente baja (inferior a 770 ºC en el caso del hierro) la mayoría de los espines apuntan en la misma dirección: el material presenta entonces una imantación macroscópica espontánea (*véase la figura 2*).

El caso antiferromagnético es más sutil. Fue descubierto con carácter teórico por Louis Néel en 1936 (premio Nobel en 1970). Su

existencia fue confirmada en 1949 por Clifford Shull y Stuart Smart en el óxido de manganeso (MnO). En las sustancias antiferromagnéticas, la energía de interacción de un par de espines vecinos es mínima cuando éstos poseen orientaciones opuestas (espines antiparalelos). Si la temperatura es suficientemente baja (inferior a –151 ºC en el óxido de manganeso) y la red cristalina presenta la geometría adecuada, se tiene una configuración ordenada en la que los espines orientados en un sentido se alternan con otros tantos que apuntan en el sentido opuesto. A esta configuración le corresponde una imantación nula (*véase el ejemplo de la red de la figura 3*).

En la red de malla cuadrada (retículo cristalino del óxido de manganeso), todas las interacciones antiferromagnéticas quedan "satisfechas": todos los pares de espines contiguos se encuentran en su estado antiparalelo, de energía mínima (suponemos aquí que un espín interactúa sólo con sus vecinos inmediatos). Existen, no obstante, situaciones en las que las interacciones binarias no pueden ser minimizadas de forma simultánea. Se habla entonces de frustración.

Tal frustración puede producirse por un mero efecto geométrico. Consideremos el "modelo de Ising" concebido en 1920 por Wilhelm Lenz y estudiado en 1925 por su discípulo Ernst Ising. Sencillo, aunque fecundo, este modelo supone que los espines se hallan en los nodos de un retículo periódico, en el plano o en el espacio; cada espín puede tomar sólo dos valores opuestos, que se representan en los esquemas mediante flechas que apuntan hacia arriba o hacia abajo. El modelo de Ising describe sustancias cuyos momentos magnéticos se ven obligados, debido a la estructura anisótropa del material, a alinearse según un eje fijo (en un medio anisótropo, las propiedades físicas dependen de la dirección en que son examinadas). Tal es el caso de numerosos compuestos de tierras raras (familia de 16 elementos metálicos, en la que figuran los lantánidos y el itrio).

Estado fundamental degenerado

Supongamos que las interacciones de espines vecinos sean antiferromagnéticas y que el retículo sea de malla triangular, es decir, compuesto por triángulos equiláteros adosados por sus lados (*véanse las figuras 2 y 3*). Este sistema presenta una frustración geométrica: en cada triángulo de tres espines vecinos inmediatos existe al menos un par de espines frustrados (paralelos, en vez de antiparalelos). En cambio, si la malla de la red es cuadrada o cúbica, ya no existe frustración: todas las interacciones de los espines vecinos pueden quedar simultáneamente satisfechas, de modo que la energía total alcanza un mínimo energético profundo (estado fundamental). En esta situación de energía mínima, una vez elegida la orientación de un espín queda determinada de forma unívoca la de todos los demás. Se dice que existe un "orden magnético". Para una energía total mínima existen, pues, dos configuraciones de espines posibles: cada una se deduce de la otra por inversión de la orientación de todos los espines.

Por el contrario, en la situación de frustración, existen para el estado fundamental múltiples configuraciones posibles. En el caso de tres espines situados en los vértices de un triángulo, son posibles seis configuraciones, correspondientes todas a una misma energía mínima. La inversión de un espín no modifica la energía del trío; por tanto, no existe orden magnético. Cuando existen varias configuraciones correspondientes a una misma energía,

2. EN UNA INTERACCION FERROMAGNETICA, dos espines contiguos tienden a orientarse en el mismo sentido (configuración de energía mínima). En una interacción antiferromagnética, la energía es mínima cuando los dos espines son antiparalelos (sentido contrario). En un sistema formado por cuatro espines ubicados en los vértices de un cuadrado, pueden satisfacerse todas las interacciones (*líneas verdes*), en el caso ferromagnético y en el antiferromagnético. En cambio, en el caso de tres espines situados en los vértices de un triángulo equilátero, no es posible satisfacer todas las interacciones antiferromagnéticas: al menos una de ellas (*líneas rojas*) es frustrada.

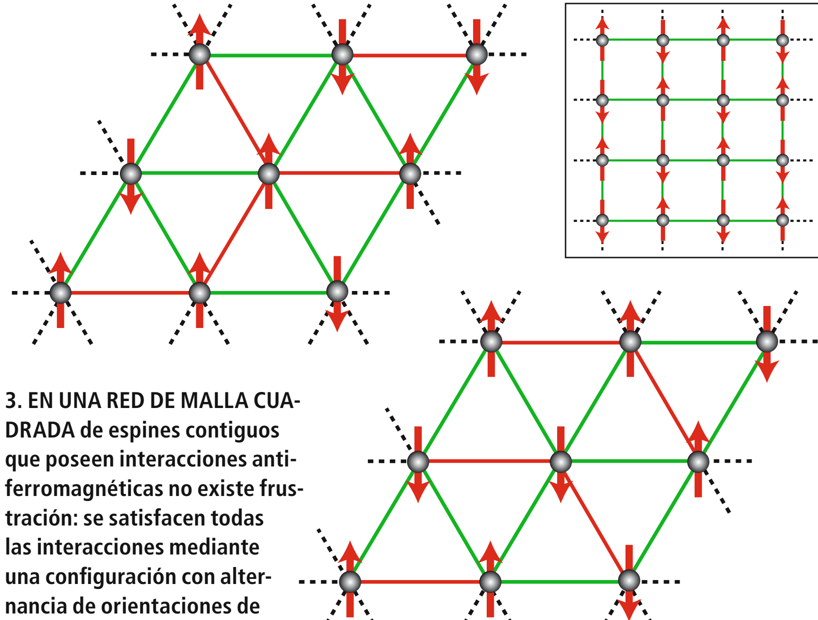
hablamos de “degeneración”. En el caso de nuestro trío de espines, se tiene también una degeneración no trivial del estado fundamental (la degeneración trivial corresponde a la inversión de todos los espines).

¿Por qué insistir en la noción de degeneración? Porque está vinculada a la entropía, una de las magnitudes fundamentales de la termodinámica. A una energía dada, la entropía corresponde a una magnitud proporcional al logaritmo del número de configuraciones accesibles al sistema para esa energía determinada. Dicho de otro modo: cuanto mayor es el número de configuraciones posibles *a priori* para el sistema, mayor es la entropía. Ahora bien, las propiedades termodinámicas del sistema, como el calor específico (la cantidad de calor que es necesario suministrarle para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa), dependen de la entropía. Así, una degeneración del estado fundamental (de energía mínima) tendrá repercusión sobre el comportamiento termodinámico del sistema a bajas temperaturas, siendo el cero absoluto (–273,15 ºC) la temperatura a la que todo sistema adopta su estado fundamental.

Puesto que los conceptos termodinámicos tienen sentido sólo para sistemas integrados por gran número de constituyentes, lo importante no es la degeneración para un trío de espines, sino la correspondiente a una red extensa, en la que intervenga una muchedumbre de espines. En presencia de frustración, la degeneración crece, en ocasiones, de forma exponencial en función del número de espines; esta situación corresponde a una entropía no nula en el cero absoluto. Ello hace ver la necesidad de matizar el enunciado habitual del tercer principio de la termodinámica, según el cual, la entropía de todo sistema es igual a 0 cuando se alcanza el cero absoluto.

Esta consecuencia de la frustración había sido detectada ya en los años cincuenta del siglo pasado por Grégory Wannier y Raymond Houtappel, que estudiaron el modelo de Ising en un retículo triangular plano. En aquel tiempo se conocía sólo un caso de sistema con entropía no nula en el cero absoluto de temperatura. Ese sistema, estudiado por Linus Pauling en 1935, corresponde a las configuraciones de la red de átomos de hidrógeno de una de las variedades cristalinas del hielo (de agua), un sistema en el que se da, asimismo, una frustración geométrica. Veremos más adelante una analogía magnética, el hielo de espín.

Consideremos de nuevo un triángulo formado por tres espines idénticos a los que asociaremos los vectores $\vec{S}_1$, $\vec{S}_2$ y $\vec{S}_3$, que podrían, en principio, apuntar en cualquier dirección (en lugar de asociarles entidades que puedan tomar sólo dos valores opuestos, paralelos a un eje). Se habla en este caso de “espines de Heisenberg”, en contraposición a los “espines de Ising”. En un triángulo, la energía total debida a la interacción de los espines es proporcional (salvo una constante aditiva) a Σ^2, donde Σ corresponde al módulo de la suma vectorial $\vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{S}_3$; el coeficiente de proporcionalidad es positivo para las interacciones antiferromagnéticas y negativo para las interacciones ferromagnéticas.



3. EN UNA RED DE MALLA CUADRADA de espines contiguos que poseen interacciones antiferromagnéticas no existe frustración: se satisfacen todas las interacciones mediante una configuración con alternancia de orientaciones de los espines (*esquema recuadrado*). En una red triangular, en cambio, existe frustración, pues resulta imposible satisfacer de forma simultánea todas las interacciones. En el estado fundamental, cada triángulo entraña una relación frustrada (*líneas rojas*). A una misma energía mínima le corresponden numerosas configuraciones de espín; se han representado aquí dos de ellas.

Así, en el caso de interacciones antiferromagnéticas, esta energía alcanza su mínimo si Σ es mínima. Cuando los espines tienen libertad para girar en todas las direcciones, este mínimo de energía se alcanza para todas las configuraciones donde los espines formen entre sí ángulos de 120 grados, pues en tales casos Σ es nula. Si los espines permanecen en el plano del triángulo, encontramos dos configuraciones básicas (*véase la figura 4*). Todas las demás configuraciones del estado fundamental se obtienen haciendo girar un mismo ángulo a dos de los espines alrededor de un eje formado por el tercer espín. Por ser el ángulo α un parámetro que puede variar de forma continua, el estado fundamental tiene una degeneración continua, de naturaleza distinta de la degeneración vista para los espines de Ising sobre un triángulo.

Si la anisotropía del material impone que los espines tengan la dirección de los ejes de simetría de triángulo, habrá sólo dos configuraciones que minimicen la energía del triángulo (*véase la figura 5*). En cambio, si las interacciones son ferromagnéticas, la energía será mínima cuando Σ sea máxima; habrá entonces

Los autores

Rafik Ballou y **Claudine Lacroix** son físicos del Instituto Néel en Grenoble (CNRS y Universidad Joseph Fourier).

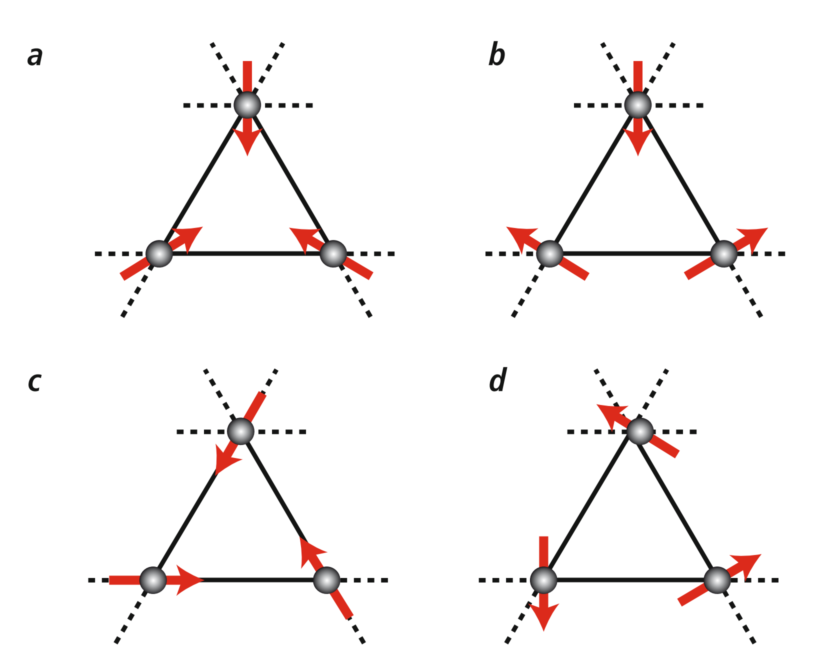
seis configuraciones posibles para el estado fundamental (*véase la figura 6*).

¿En qué se convierte el estado fundamental correspondiente a una red de espines de Heisenberg compuesta por triángulos? Examinemos el caso antiferromagnético en una red triangular, en la cual cada espín es común a seis triángulos (*véase la figura 7*), y en una red kagomé (*véase la figura 8*), en la que cada espín pertenece sólo a dos triángulos (kagomé es el nombre que recibe en Japón un motivo muy utilizado en el trenzado de cestas). Según lo visto, si los espines tienen libertad para girar, la energía es mínima cuando la suma Σ de los espines es nula en cada uno de los triángulos.

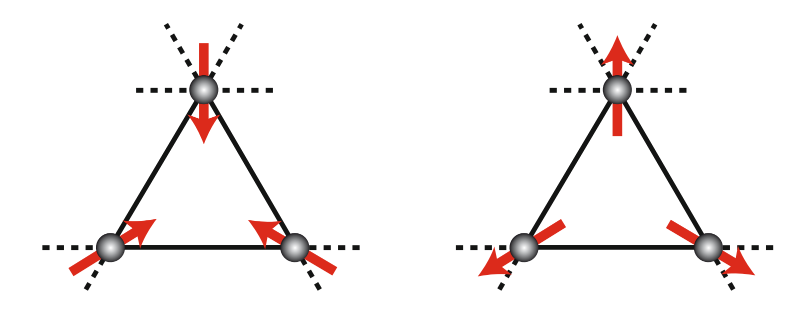
Tomemos un triángulo formado por tres espines orientados mutuamente en ángulos de 120 grados, configuración que minimiza la energía del triángulo. Tratemos de satisfacer las interacciones pasando desde cada triángulo a uno vecino, comenzando por los triángulos adyacentes. Se constata que, sobre la red triangular, la configuración de todos los espines queda determinada por la configuración del triángulo de partida. La red triangular antiferromagnética presenta, pues, un orden magnético.

Pero las cosas son distintas en el caso de la red kagomé antiferromagnética. En un triángulo adyacente que comparta un vértice con el triángulo inicial, la configuración de éste determina sólo el estado de un espín. Este triángulo adyacente posee una infinidad continua, parametrizada por el ángulo α definido antes, de configuraciones a 120 grados con un espín prefijado y dos espines libres (*véase la figura 8*). Al proseguir, pasando de cada triángulo a su vecino, vemos que existe una infinidad de configuraciones posibles para la red kagomé, correspondientes todas ellas a la misma energía mínima.

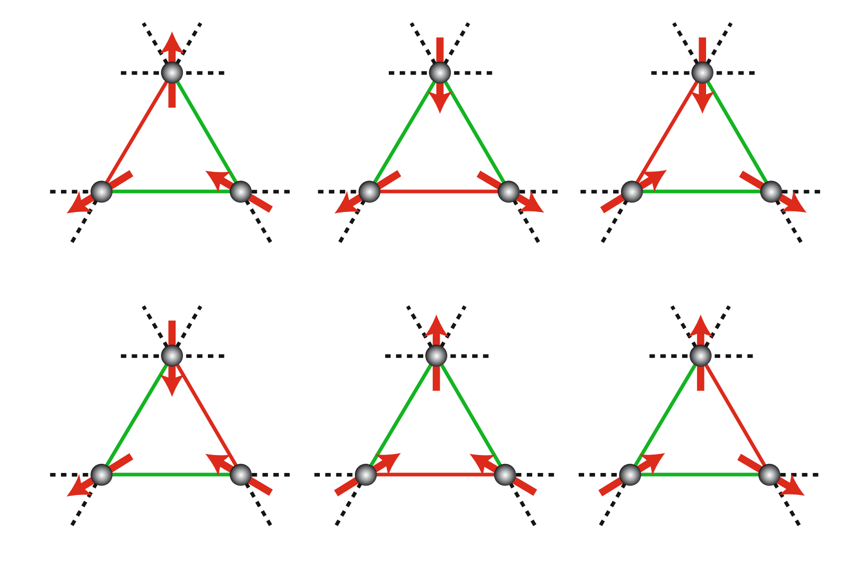
Apreciamos aquí una diferencia esencial entre estas dos redes. En la triangular, donde cada espín pertenece a seis triángulos, la "conectividad" es elevada e impone un orden magnético. En la red kagomé, en la que cada espín pertenece sólo a dos triángulos, la conectividad es laxa y consiente un gran número (en teoría, una infinidad) de estados de igual energía; el número de configuraciones de energía mínima crece de forma exponencial



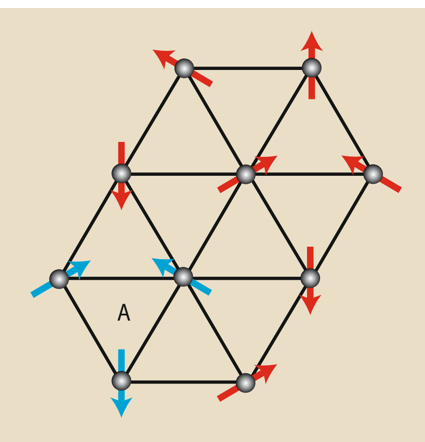
4. SI LOS ESPINES TIENEN LIBERTAD DE ROTACION, el estado de energía mínima de un triángulo con interacciones antiferromagnéticas se obtiene cuando la suma vectorial de los espines es nula (ángulos de 120 grados entre cada par de espines). Se tienen dos configuraciones básicas, planas (*a* y *b*); todas las demás se deducen de éstas. Las configuraciones planas *c* y *d* se deducen de la configuración *a* mediante la aplicación de una rotación a cada espín (de –30 y –120 grados, respectivamente). Las configuraciones no planas se obtienen haciendo girar dos espines un mismo ángulo en torno a un eje paralelo al tercer espín.



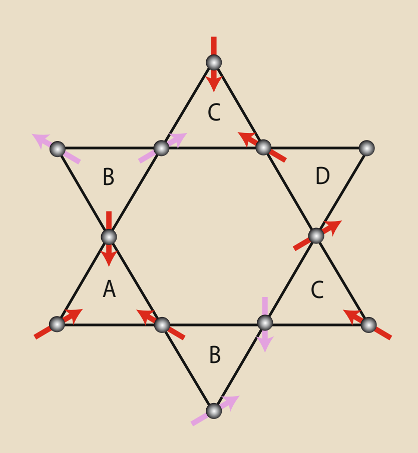
5. EN CIERTAS REDES TRIANGULARES se dan anisotropías que obligan a los espines a alinearse paralelamente a los ejes de simetría. La energía mínima correspondiente a un triángulo con interacciones antiferromagnéticas se obtiene mediante dos configuraciones opuestas.



6. SI LOS ESPINES SE VEN OBLIGADOS a alinearse según los ejes de simetría del triángulo y las interacciones son ferromagnéticas, existen seis configuraciones para el estado fundamental. Cada una de ellas tiene dos enlaces bastante satisfechos (*ángulo agudo, líneas verdes*) y un enlace bastante frustrado (*ángulo obtuso, líneas rojas*).



7. EN UNA RED TRIANGULAR de interacciones antiferromagnéticas, si se fija una configuración de energía mínima para un primer triángulo (*A*), quedan determinadas, una tras otra, todas las configuraciones de los demás triángulos: los espines van siendo sucesivamente determinados por la condición de que la suma vectorial sea nula en cada triángulo.



8. EN UNA RED KAGOME de interacciones antiferromagnéticas, la elección de una configuración para un primer triángulo *A* deja gran libertad a los demás. Incluso si se obliga a los espines a permanecer en el plano reticular, se tienen dos elecciones posibles para los triángulos *B*, y otras dos para los triángulos *C* (que determinarán el triángulo *D*).

con el número de triángulos, incluso si nos limitamos a configuraciones planares.

Los retículos que hemos examinado hasta ahora son bidimensionales, pero cabe idear también redes tridimensionales con frustración geométrica. Entonces, la célula elemental que debe considerarse es, en lugar del triángulo, el tetraedro. Cuatro espines ubicados en los vértices de un tetraedro forman cuatro triángulos; se demuestra en tal caso que si las interacciones son antiferromagnéticas, la energía total resulta mínima cuando la suma de los cuatro espines de cada tetraedro es nula. Al ensamblar los tetraedros por pares que tengan un vértice en común se obtiene el equivalente tridimensional de la red kagomé: el retículo pirocloro (*véanse las figuras 1 y 10*). En el caso de espines sin anisotropía se tiene, lo mismo que antes, una degeneración continua.

Cuando la temperatura disminuye hasta el cero absoluto, un sistema tal, cuyo estado fundamental es fuertemente degenerado, no queda fijo en una configuración definida (periódica, por ejemplo) de momentos magnéticos. En consecuencia, los retículos kagomé y pirocloro (sistemas frustrados) no poseen, a temperaturas bajas, un orden magnético fijo.

Cuando impera el orden magnético

En los materiales reales, en cambio, se dan numerosas interacciones más débiles que eliminan la degeneración y establecen un orden magnético. Puede tratarse de interacciones entre espines cercanos, aunque no vecinos, de anisotropías cristalinas que favorezcan la presencia de ciertas orientaciones de los espines o de interacciones magnetoelásticas que deforman el retículo cristalino (lo que modifica las distancias entre espines y, en consecuencia, sus interacciones). Por todo ello, se establece a menudo un orden magnético complejo, pero a una temperatura baja, característica de las energías asociadas a estas interacciones de menor intensidad y no a las interacciones principales entre espines contiguos. En ocasiones, sin embargo, parece que las interacciones secundarias no se hallan siempre presentes, ni son suficientes para eliminar la degeneración. Se conocen sólo unos pocos materiales cuyo comportamiento esté dominado por los efectos de frustración geométrica hasta las temperaturas más bajas. Tales materiales son objeto de investigación.

En 1997, Mark Harris, Steven Bramwell y otros colaboradores (un equipo de físicos ingleses, daneses y alemanes) descubrieron un nuevo estado magnético en los sistemas pirocloros, precisamente en el compuesto $Ho_2Ti_2O_7$: el "hielo de espín". Dicho estado, observado posteriormente en el compuesto $Dy_2Ti_2O_7$, está inducido por la frustración de interacciones ferromagnéticas, no de las antiferromagnéticas, lo que constituye un fenómeno insólito.

En esos compuestos, los átomos de disprosio (Dy) o de holmio (Ho) son los únicos portadores de momento magnético; forman un retículo pirocloro de tetraedros conectados por los vértices. Una anisotropía magnetocristalina muy potente congela la dirección de cada espín según el eje de simetría del tetraedro en ese vértice. Por tratarse de una interacción ferromagnética, los espines tenderían a orientarse en un mismo sentido. Sin embargo, la anisotropía lo impide: se tienen, para cada tetraedro, seis configuraciones de energía mínima (*véase la figura 9*), en las cuales dos de los espines del tetraedro apuntan hacia el interior y otros dos hacia el exterior. En cada configuración hay cuatro enlaces satisfechos (con otras palabras y, habida cuenta de la anisotropía, los dos espines del enlace forman un ángulo agudo), pero otros dos quedan frustrados (ángulo obtuso).

Cuando los espines imitan al hielo

Los compuestos mencionados fueron los primeros sistemas magnéticos en los que se descubrió una vigorosa analogía con un sistema frustrado que había sido identificado en los años treinta del siglo pasado: una forma cristalina del hielo de agua, la I_h (*véase la figura 10*). Los átomos de hidrógeno del hielo I_h tejen una red de tetraedros semejante a la red piroclora, con los átomos de oxígeno en el interior de los tetraedros. Sin embargo, el átomo de oxígeno no ocupa el centro exacto del tetraedro: se encuentra más próximo a dos de los cuatro átomos de hidrógeno (y más distante de los otros dos), de modo que se forma una molécula H_2O. Si se dibuja una flecha que vaya desde cada átomo de hidrógeno al átomo de oxígeno más cercano, la configuración de cada tetraedro es tal, que se tienen dos flechas hacia el interior y otras dos hacia el exterior; de ahí se sigue una perfecta analogía con los sistemas de espines ferromagnéticos de los compuestos $Dy_2Ti_2O_7$ y $Ho_2Ti_2O_7$, lo que explica la terminología "hielo de espín".

En 1935, Pauling calculó la degeneración del estado fundamental del hielo I_h del agua. Dedujo que la entropía por sitio, en el cero absoluto, no era nula, sino igual a $(1/2)R \ln(3/2)$ (donde R es la constante de los gases perfectos). Este valor es próximo al medido en los compuestos $Dy_2Ti_2O_7$ y $Ho_2Ti_2O_7$. Se trata de casos excepcionales, en los cuales se ha medido una entropía no nula a temperatura muy baja. Este resultado parecía contradecir la tercera ley de la termodinámica, pero no es así, pues el enunciado de la misma estipula que la

entropía es una función monótona creciente de la temperatura (tal como acontece aquí).

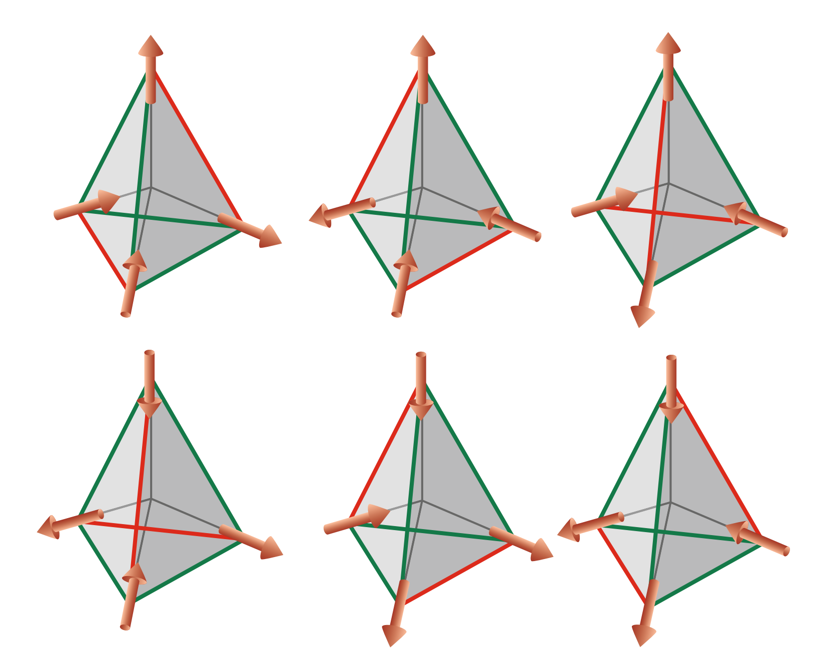
Hemos visto que, en los retículos kagomé y pirocloro, las interacciones antiferromagnéticas entre espines contiguos no pueden por sí solas desembocar en un orden magnético estable. No obstante, estas interacciones imponen que la suma vectorial de los espines correspondientes a cada célula (triángulo o tetraedro) sea nula en el cero absoluto. En consecuencia, en estos retículos, los espines vecinos se hallan fuertemente correlacionados y no tienen libertad para fluctuar de modo independiente a bajas temperaturas. En la red kagomé, cada espín tiende a mantener en todo momento un ángulo de 120 grados con sus cuatro vecinos más próximos.

Correlaciones "líquidas"

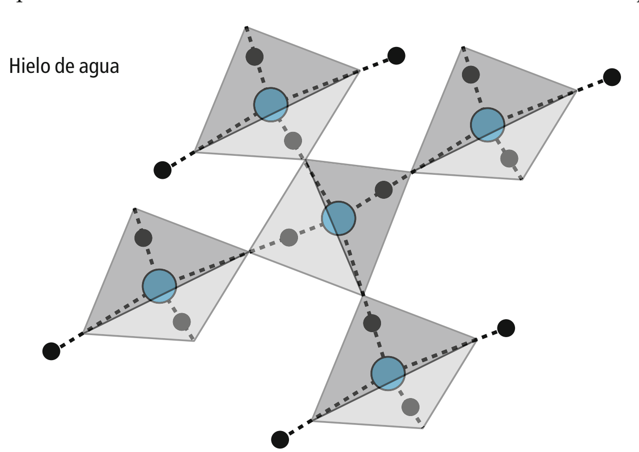
Estas correlaciones entre espines son análogas a las correlaciones entre las posiciones de las moléculas de un fluido, de ahí que se denomine "líquido de espín" a la fase magnética que caracteriza a estas redes. Lo mismo que las correlaciones de posición de un fluido, las correlaciones de espín pueden medirse mediante la difusión de neutrones en el material. Así se identificó en 1996 una fase de líquido de espín en el YMn_2, por Eddy Lelièvre-Berna, Bjorn Fak y uno de los autores (Ballou) en Grenoble, y en el $Tb_2Ti_2O_7$, en 1999, por el equipo de John Greedan, de la Universidad McMaster, en Canadá.

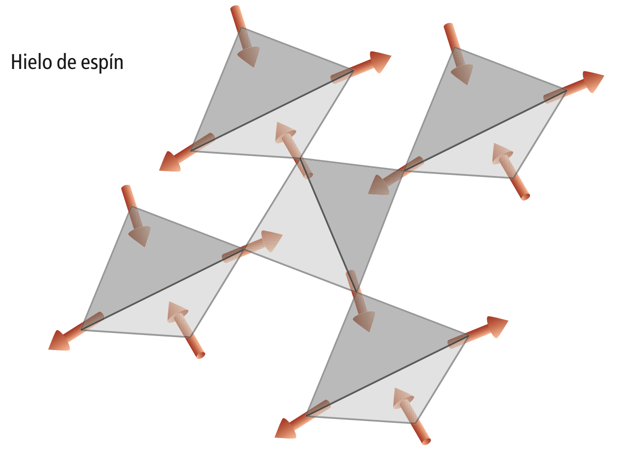
Hasta este punto hemos dado a los espines la consideración de objetos clásicos, equiparables a vectores de longitud S, posiblemente restringidos por una anisotropía (axial o planar). Tal descripción resulta válida para algunos materiales, pero no para todos. El espín corresponde a una magnitud cuántica. Obedece, pues, a leyes especiales: la más notable, que S toma sólo valores enteros o semienteros (0, 1/2, 1, 3/2, 2, etcétera) en las unidades apropiadas. La aproximación clásica resulta válida sólo cuando S toma valores elevados. Cuanto menor es S, mayor importancia reviste su naturaleza cuántica y las analogías entre un líquido de espín y un líquido ordinario dejan de ser válidas.

Para los espines cuánticos, se ha establecido (teóricamente) que la frustración constituye la fuente de propiedades inesperadas y originales, no todas elucidadas todavía. Examinemos el caso de dos espines 1/2 en interacción antiferromagnética. Se demuestra que el estado fundamental de esta pareja de espines corresponde a una superposición cuántica de dos configuraciones antiparalelas posibles: (+1/2, –1/2) y (–1/2, 1/2). El espín total asociado a esta superposición es nulo (S = 0): se trata de un estado singlete no-magnético. Una cierta energía lo separa del estado excitado inmediatamente superior, cuyo espín total es S = 1.



9. PARA UN TETRAEDRO REGULAR de espines con interacciones ferromagnéticas, si se supone que la dirección de los espines se encuentre fija según los ejes de simetría, se tienen seis configuraciones de una misma energía mínima. Existe frustración: en cada una de estas configuraciones hay cuatro enlaces satisfechos (*ángulos agudos, líneas verdes*) y, necesariamente, dos frustrados (*ángulos obtusos, líneas rojas*).





10. LA ESTRUCTURA DEL HIELO (H_2O) en su forma cristalina I_h, definida por los segmentos que enlazan los átomos de oxígeno (*azul*) con los átomos de hidrógeno más próximos (*negro*), es exactamente del mismo tipo que la descrita por los espines de una red piroclora de interacciones ferromagnéticas en el estado fundamental. De ahí que este sistema magnético se denomine "hielo de espín".

ORDEN POR DESORDEN

Cuando en un material con orden magnético se introduce un desorden (por ejemplo, mediante sustituciones químicas que reduzcan la concentración de sitios magnéticos) suele desestabilizarse el orden magnético. Sin embargo, ciertos sistemas con frustración geométrica exhiben, contra pronóstico, un efecto inverso: si bien la frustración impide que se ordene el sistema, se induce un orden por aumento del desorden.

Tal es el caso de la jarosita, un mineral de hierro. Cuando se aumenta la proporción de iones no magnéticos en el retículo kagomé que forman los iones férricos Fe^{3+} aparece un orden magnético bien definido. El desorden químico destruye localmente la frustración geométrica: un triángulo que contenga sólo dos sitios magnéticos deja de ser frustrado. Existen también procesos de ordenación derivados de fluctuaciones térmicas, pero son más sutiles y dificultosos de evidenciar experimentalmente. Este parece ser el caso del compuesto pirocloro $Er_2Ti_2O_7$, que presenta un orden magnético en el que todos los espines son colineales a baja temperatura.

Este fenómeno de ordenación provocada por un desorden resulta paradójico, pues las fluctuaciones tienden a destruir el orden (lo que, por otra parte, ocurre en el compuesto $Er_2Ti_2O_7$ cuando se eleva excesivamente la temperatura). Este fenómeno de "orden por desorden" se cuenta entre los efectos insólitos característicos de la frustración magnética.

Suele definirse un líquido de espín cuántico como un sistema macroscópico, de gran número de constituyentes, cuyo estado fundamental posee espín total nulo ($S = 0$, donde S corresponde al espín del conjunto de constituyentes) y cuyo primer estado de excitación magnética (en general $S = 1$) tiene una energía superior a la del estado fundamental singlete. La diferencia entre esas energías, el "hiato de espín" (*gap*), corresponde a la energía mínima que debe suministrarse para pasar de un estado fundamental no magnético (espín nulo) a un estado magnético (espín total 1). La existencia de un hiato de espín no nulo entraña consecuencias para el comportamiento del sistema a temperaturas muy bajas. La susceptibilidad magnética (relación entre la imantación del material y la intensidad del campo magnético aplicado) decrece exponencialmente cuando la temperatura tiende hacia el cero absoluto; en ausencia de hiato de espín, en cambio, la susceptibilidad magnética varía como una potencia de la temperatura.

¿Es posible que un sistema bidimensional o tridimensional constituya un líquido de espín cuántico? La cuestión lleva largo tiempo sin respuesta, porque los cálculos relativos a los espines cuánticos suelen ser inextricables. En 1973, Philip Anderson (premio Nobel de 1977) propuso que, gracias a la frustración, era posible la realización de un líquido de espín cuántico mediante el retículo triangular de espines 1/2.

La herbertsmithita, un líquido de espín cuántico

Anderson había propuesto que el estado fundamental de este sistema bidimensional fuese descrito como una superposición cuántica de estados, en la que cada uno correspondía a una descomposición de la red en pares de espines vecinos, singletes de espín (*véase la figura 11*). Anderson dio a tal estado el nombre de RVB (de "Resonating Valence Bond", enlace de valencia resonante); se trata de un estado complejo, puesto que existe un gran número de posibles descomposiciones de la red triangular en pares de espines vecinos.

En el caso de la red triangular, la descripción RVB ha sido abandonada. Según estudios teóricos, esta red posee, a baja temperatura, un orden antiferromagnético de gran alcance; no constituye, por consiguiente, un líquido de espín. En cambio, de acuerdo con investigaciones más recientes, los estados de tipo RVB resultan adecuados para describir la red kagomé de espines 1/2: el estado fundamental corresponde a una superposición cuántica de estados formados por singletes mediante dos espines vecinos; lo mismo vale para los estados excitados de poca energía. El estado fundamental de esta red corresponde a un singlete ($S = 0$); existe un hiato de espín que separa este singlete del primer estado de espín total $S = 1$, pero existe todo un continuo de estados singletes (estados RVB) cuya energía es intermedia entre la fundamental y la del estado $S = 1$.

¿Existe un material que corresponda a la red kagomé de espines 1/2 con interacciones ferromagnéticas? La respuesta es afirmativa: la herbertsmithita, un mineral raro de fórmula $ZnCu_3(OH)_6Cl_2$. Los átomos de cobre, de espín 1/2, forman en ella planos kagomé. En 2004, Daniel Nocera y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, lograron sintetizar este mineral; ello abrió la puerta al estudio de probetas de pureza suficiente. A partir de 2006, varios equipos han demostrado que la herbertsmithita no presenta orden magnético hasta que se encuentra por debajo de 0,4 kelvin. Este mineral constituye, pues, un claro aspirante al título de líquido de espín cuántico; sin embargo, las medidas de sus propiedades termodinámicas a baja temperatura, todavía incompletas, tendrán que confirmarlo.

El retículo kagomé y, en particular, la herbertsmithita, corresponden a sistemas bidimensionales. ¿Existen ejemplos tridimensionales de líquidos de espín cuántico? Benjamin Canals y uno de los autores (Claudine Lacroix) demostraron en 1998, en Grenoble, que la red piroclora de espines 1/2 constituye un sistema tal. Se trata del único modelo teórico conocido de líquido de espín cuántico tridimensional. Sus propiedades guardan semejanza con las de la red kagomé. Sin embargo, por el mo-

mento no se ha identificado ningún ejemplo experimental de sistema pirocloro cuántico que permanezca desordenado hasta el cero absoluto. Las investigaciones continúan.

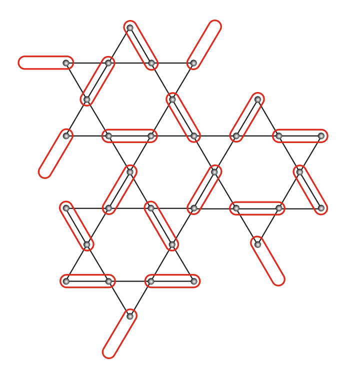
Frustración magnética refrigerante

La frustración de espines podría intervenir en otros contextos. Podría dar lugar a una fase del tipo vidrio de espín. Recordemos que, en un vidrio de espín, las posiciones de los espines, o sus interacciones, son desordenadas; ello le confiere propiedades termodinámicas peculiares. Parece que en un sistema carente de desorden la frustración puede conducir a propiedades análogas, por un mecanismo distinto. La fase correspondiente, el vidrio de espín topológico, y del que tal vez se tenga un ejemplo en la jarosita (compuesto de hierro), no se comprende todavía.

Otra de las cuestiones estudiadas corresponde a la superconducción en los sistemas de espín frustrados. Philip Anderson había propuesto ya que el estado superconductor podría estar asociado a un estado de tipo RVB. Ahora bien, se han descubierto en fecha reciente varios superconductores de red piroclora de espines ($Cd_2Re_2O_7$ o KOs_2O_6); asimismo, la comprensión de la superconducción en tales sistemas es objeto de numerosos trabajos.

Por fin, señalemos que la frustración de espines podría desembocar en aplicaciones prácticas. Mike Zhitomirsky, del CEA de Grenoble, conjeturó en 2003 que los líquidos de sistemas frustrados, como los descritos por nosotros, deben presentar un gigantesco efecto magnetotérmico (cambio de temperatura provocado por un cambio de imantación).

Utilizado en la refrigeración magnética, el efecto magnetotérmico se obtiene cuando, a cierta temperatura, se provoca, sin intercambio de calor, una variación abrupta del campo magnético aplicado al material (desimantación adiabática). En tal caso, la entropía debe permanecer constante, lo que es posible sólo si varía la temperatura (pues la entropía es una función del campo aplicado y de la temperatura). Como ya hemos mencionado, la entropía de los materiales frustrados sigue siendo muy grande a baja temperatura, por lo que es de esperar un efecto magnetotérmico varios órdenes de magnitud mayor que el de los materiales utilizados habitualmente en la refrigeración magnética. La búsqueda de materiales utilizables para la refrigeración magnética experimenta un gran desarrollo, dado que esta técnica se considera más ecológica que las técnicas clásicas de gases refrigerantes. Vemos aquí una posible e insospechada aplicación de los sistemas frustrados, que en un principio merecieron sólo el interés de los teóricos.



11. LA RED KAGOME formada por espines cuánticos antiferromagnéticos constituye un líquido de espín cuántico. Su estado fundamental se describe como una superposición cuántica de estados, cada uno de los cuales corresponde a una partición de la red en pares de espines. En una tal descomposición (aquí un ejemplo) se supone que cada par de espines (*contorno rojo*) se encuentra en un estado singlete, cuyo espín total es nulo.

Bibliografía complementaria

QUANTUM SPIN LIQUIDS. F. Mila en *European Journal of Physics*, vol. 21, n.º 6, págs. 499-510; 2000.

GEOMETRICAL FRUSTRATION. R. Moessner y A. P. Ramírez en *Physics Today*, vol. 59, n.º 2, págs. 24-29; febrero de 2006.

FRUSTRATED RARE EARTH MAGNETISM: SPIN GLASSES, SPIN LIQUIDS AND SPIN ICES IN PYROCHLORE OXIDES. J. E. Greedan en *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 408-412, págs. 444-455; 2006.

NEW CANDIDATE EMERGES FOR A QUANTUM SPIN LIQUID. B. Goss Levi en *Physics Today*, vol. 60, n.º 2, págs. 16-19; febrero de 2007.

Morfología del CEREBRO

Poco a poco comienzan a conocerse los pormenores de la formación de las circunvoluciones cerebrales. Al ahondar en esa línea de investigación, esperan los clínicos, podrá mejorarse el diagnóstico y el tratamiento del autismo, la esquizofrenia y otros trastornos mentales

Claus C. Hilgetag y Helen Barbas

CONCEPTOS BASICOS

- La corteza confiere al cerebro su rugosidad superficial característica. Interviene en el procesamiento complejo de nuestras percepciones, pensamientos, emociones y actos.
- Gracias a su intrincado repliegue, la corteza, expansiva, se ajusta en una caja craneana con una superficie menor.
- Descubrimientos recientes muestran que la tensión mecánica entre neuronas crea los surcos y los giros corticales.
- El paisaje cortical de los individuos sanos difiere del panorama de quienes sufren autismo u otros trastornos mentales originados durante la gestación. Las diferencias morfológicas llevan a conjeturar que, en los individuos afectados, se salen también de la norma las conexiones entre regiones cerebrales.

Uno de los primeros fenómenos que se aprecian en el cerebro humano es su intrincado paisaje de montes y valles. Estas circunvoluciones se deben a la corteza cerebral, un manto de dos a cuatro milímetros de espesor, formado por un tejido gelatinoso repleto de neuronas, la "sustancia gris", que media nuestras percepciones, pensamientos y actos. Otros mamíferos con cerebro voluminoso (ballenas, perros y primates no humanos, los grandes simios, entre otros) poseen también un cerebro rugoso, dotado de una configuración de circunvoluciones característica. Los mamíferos de cerebro pequeño y otros vertebrados poseen, en cambio, un encéfalo liso.

La corteza cerebral de los mamíferos con cerebro voluminoso se expandió en el curso de la evolución en mayor medida que la caja craneana. De hecho, si extendiéramos sobre un plano la corteza cerebral humana, ocuparía la superficie de una paella, tres veces mayor que el área interior de la caja craneana. Por consiguiente, la única forma de que la corteza de los humanos y de otras especies con cerebro voluminoso encaje en la caja craneana es plegándose.

Pero este repliegue no se efectúa al azar, como si se arrugase una hoja de papel. Antes bien, exhibe una configuración coherente de un individuo a otro. ¿Cómo se produce el repliegue de la corteza cerebral? ¿Qué revela la topografía resultante sobre las funciones cerebrales? Nuevas investigaciones indican que una red de fibras nerviosas va ejerciendo tracción sobre la corteza y dándole forma durante el desarrollo fetal; posteriormente, la mantiene en su lugar a lo largo de la vida. Si esta red sufre perturbaciones, sea durante la gestación o, más adelante, a causa de una lesión o un accidente vascular, las consecuencias para la morfología cerebral y la comunicación intraencefálica pueden ser de gran alcance. Los descubrimientos mencionados podrían conducir a nuevas técnicas de diagnóstico y tratamiento de pacientes que sufren trastornos mentales.

Fuerzas internas

Hace largo tiempo que el estudio de la intrincada forma del cerebro plantea innúmeras cuestiones a los expertos. A principios del siglo XIX, Franz Joseph Gall propuso que la forma del cerebro y el cráneo de un individuo revelaba un sinfín de características de su inteligencia y personalidad. La frenología, de ella hablamos, aunque falta de respaldo científico, ejerció gran influencia; llevó a la recolección y estudio de cerebros "criminales", "degenerados" o "geniales". Más tarde, en las postrimerías del siglo XIX, Wilhelm His sostuvo que el cerebro se desarrollaba a través de una sucesión de acontecimientos guiados por fuerzas físicas. D'Arcy Thompson, basándose en estas ideas, demostró que las formas de numerosas estructuras, biológicas e inanimadas, resultan de una autoorganización física.

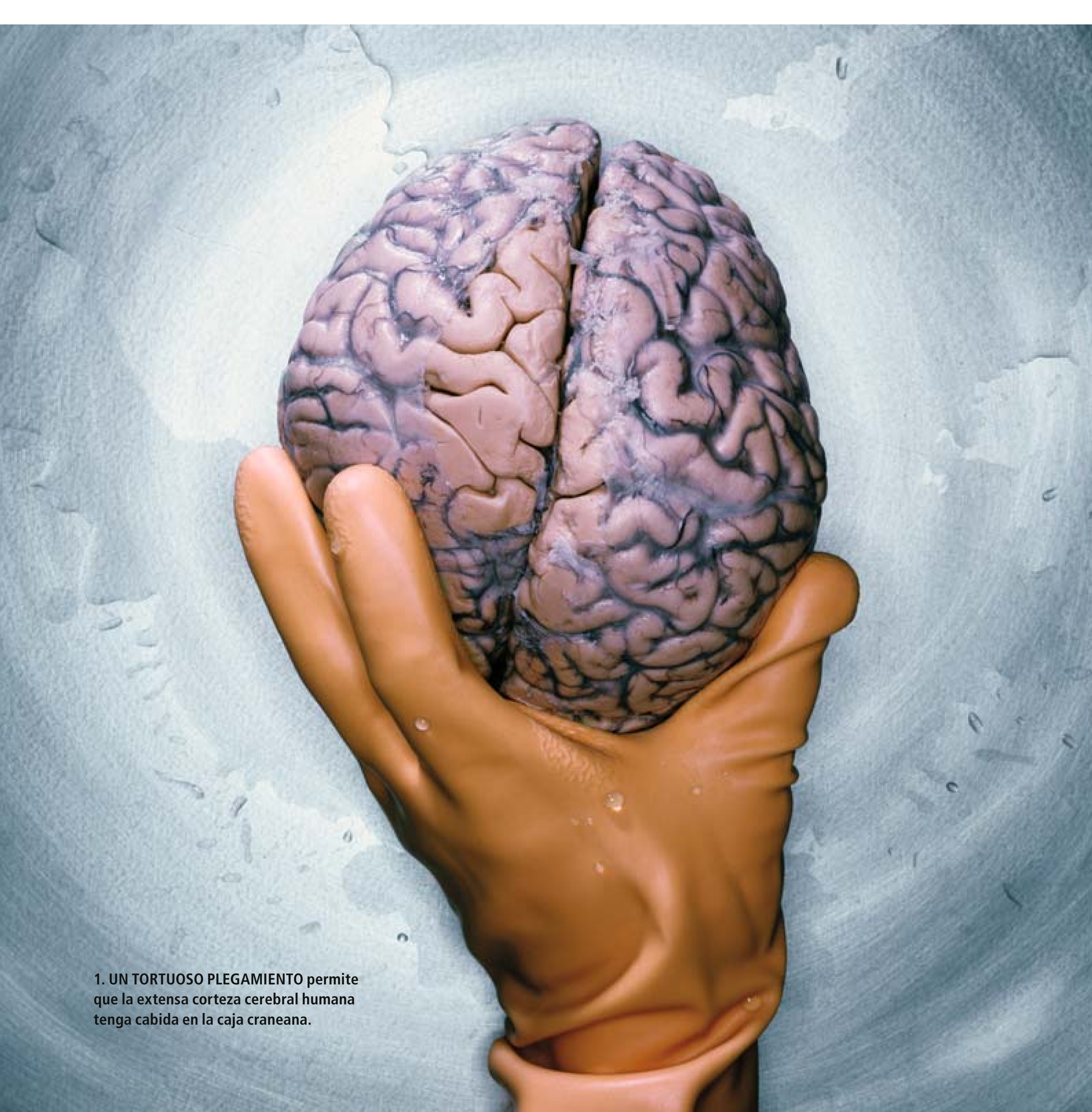
Aunque muy sugestivas, estas primeras hipótesis acabaron disolviéndose. La frenología fue arrumbada entre las pseudociencias; las

DAN WINTERS

teorías genéticas modernas eclipsaron la metodología biomecánica para el estudio de la estructura cerebral. Sin embargo, las pruebas obtenidas recientemente con técnicas novedosas de formación de imágenes cerebrales, acompañadas de refinados análisis informáticos, han dotado de renovado aliento a algunas de aquellas nociones decimonónicas.

En 1997 salieron a la luz indicios de que His y Thompson se hallaban en el buen camino cuando sostenían que eran fuerzas físicas las que daban forma a las estructuras biológicas. David Van Essen, de la Universidad de Washington en St. Louis, publicó en *Nature* una hipótesis en la que sugería que las fibras nerviosas que vinculan distintas regiones de la corteza (lo que permite que unas partes entren en comunicación con otras) producían minúsculas fuerzas de tracción sobre ese tejido gelatinoso.

En un feto humano, la corteza comienza siendo lisa y, en su mayor parte, permanece

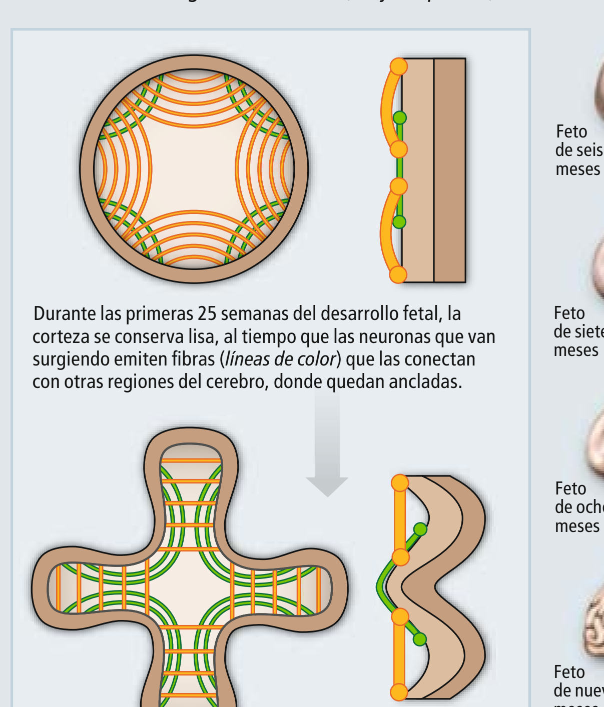


1. UN TORTUOSO PLEGAMIENTO permite que la extensa corteza cerebral humana tenga cabida en la caja craneana.



PLEGAMIENTO CEREBRAL

Las rugosidades de la capa cerebral más externa, la corteza, se gesta ya en el útero materno. El plegamiento está inducido por fuerzas mecánicas, generadas por las neuronas que conectan diversas regiones cerebrales (*abajo, izquierda*).



Durante las primeras 25 semanas del desarrollo fetal, la corteza se conserva lisa, al tiempo que las neuronas que van surgiendo emiten fibras (*líneas de color*) que las conectan con otras regiones del cerebro, donde quedan ancladas.

Conforme crece la corteza, la tracción, cada vez mayor, entre regiones conectadas por un gran número de fibras (*naranja*) comienza a aproximarlas, creando entre ellas una prominencia, o giro. Las regiones débilmente conectadas (*verde*) se separan y aparece un valle, o surco. En el momento del parto, el plegamiento cerebral está casi completo.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: CORTESIA DE CLAUS C. HILGETAG Y HELEN BARBAS (*dibujos del córtex*); CORTESIA DE BRUCE FISCHL (*MRI*)

así a lo largo de los seis primeros meses de gestación. Durante ese período, las neuronas recientes emiten axones, fibras longuilíneas, para que se acoplen a los componentes receptivos (dendritas) de neuronas diana alojadas en otros puntos de la corteza. Seguidamente, los axones quedan, como si de una traílla se tratase, "atados" a las dendritas. Al expandirse la corteza, los axones experimentan una tensión creciente; se estiran a modo de cintas elásticas. Avanzado el segundo trimestre, cuando las neuronas se hallan emergiendo, migrando y conectándose, empieza a replegarse la corteza. Llegado el momento del parto, la corteza se encuentra a punto de completar su desarrollo y presenta su figura rugosa característica.

Van Essen sostenía que dos regiones estrechamente vinculadas (conectadas mediante múltiples axones) se aproximan más todavía durante la gestación, en razón de la tensión mecánica que ejercen los axones enganchados, lo que insta la aparición de una prominencia, o "giro", entre ellas. Un par de regiones laxamente conectadas, en cambio, se desplazan a la deriva y quedan separadas por un valle, o surco.

Las técnicas modernas de rastreo de las sendas nerviosas han demostrado que el sistema de comunicación de la corteza es responsable también de la modelación del cerebro. De acuerdo con un sencillo modelo mecánico, si cada axón ejerciese una tracción minúscula, la fuerza conjunta de los axones que vinculan áreas intensamente conectadas alisaría las sendas de los axones. La técnica del rastreo retrógrado consiste en inyectar en una pequeña porción de la corteza una tinción que es absorbida en los extremos de los axones y retrotransportada hasta el soma, o cuerpo celular, de la neurona progenitora.

La técnica del rastreo retrógrado pone de manifiesto qué regiones envían axones hasta el punto de inyección; además, permite averiguar la densidad de conexiones en un área y la forma que adoptarán las sendas de los axones.

Los estudios de rastreo retrógrado que hemos realizado en un gran número de conexiones neuronales de macaco rhesus revelan que, tal como se pronosticaba, la mayoría de las conexiones siguen sendas rectilíneas o levemente curvadas. Cuanto mayor es la densidad de las conexiones, más rectilíneas tienden a ser éstas.

La capacidad escultórea de las conexiones neuronales resulta especialmente manifiesta en las diferencias morfológicas entre las regiones asociadas al habla de los hemisferios izquierdo y derecho del cerebro humano. Tomemos la forma de la cisura de Silvio, hendidura que separa las regiones frontal y posterior correspondientes al lenguaje. La cisura en el lado izquierdo del cerebro es menos profunda (más somera) que la del hemisferio derecho. Esta asimetría parece guardar relación con la anatomía de un gran haz de fibras nerviosas, el fascículo arqueado, que viaja en torno a la cisura silviana y conecta las regiones frontal y posterior de las áreas de lenguaje.

Basándonos en esta observación, y en el hecho de que en la mayoría de las personas la responsabilidad del habla recae sobre el hemisferio izquierdo, hemos postulado, en un artículo publicado en 2006, que el fascículo arqueado de la izquierda es más denso que el de la derecha. Varios estudios de formación de imágenes del cerebro humano han confirmado dicha asimetría en la densidad de fibras. En

teoría, el haz de fibras de mayor densidad debería ejercer una tracción más vigorosa y, en consecuencia, ser menos curvado que el haz correspondiente al hemisferio derecho, menos denso. No obstante, esta hipótesis no ha sido verificada todavía.

De macro a micro

Las fuerzas mecánicas no son responsables sólo de la morfología macroscópica de la corteza cerebral; afectan también a la estructura estratificada. La corteza consta de capas de células dispuestas horizontalmente, superpuestas como en una tarta de varios sabores. Las capas son seis en la mayoría de las regiones; las láminas individuales de cada área varían en espesor y composición. Las regiones corticales que gobiernan los sentidos primarios cuentan con una capa poderosa 4; la región que controla las funciones motoras voluntarias tiene una capa asimismo poderosa 5; las áreas corticales con funciones asociativas (subyacentes al pensamiento y la memoria) poseen una capa gruesa 3.

Tales variaciones de la estructura laminar se vienen utilizando desde hace más de un siglo para dividir la corteza en áreas especializadas. Adquirió especial renombre el trabajo de Korbinian Brodman, creador de un mapa de la corteza que se aplica todavía en nuestros días. En el plegamiento se modifica el espesor relativo de los estratos, como ocurriría si se doblase una pila de esponjas. En los giros, las capas superiores de la corteza se estiran y adelgazan; en los surcos, las capas superiores se comprimen y engruesan. Estas relaciones se invierten en los estratos corticales profundos.

De ese manojo de observaciones se ha inferido lo siguiente: mientras que las formas de las capas y de las neuronas cambian al ser éstas estiradas o comprimidas, el área total de la corteza y el número de neuronas que comprende son los mismos. Si tal hipótesis fuera cierta, las regiones gruesas de la corteza (las capas profundas de los giros) deberían contener menos neuronas que las regiones finas. Este modelo isométrico supone que, durante el desarrollo, las neuronas empiezan emigrando a la corteza y que, luego, la corteza se pliega. Imaginemos, como símil, que doblamos una bolsa de arroz: la forma de la bolsa cambia, pero se mantienen su capacidad y el número de granos.

Nuestras investigaciones sobre la densidad de neuronas en áreas de la corteza prefrontal de macaco rhesus revelan que el modelo isométrico es erróneo. Valiéndonos de estimaciones basadas en muestras representativas de la corteza frontal, hemos determinado que las capas profundas de los giros cuentan con la misma densidad de población neuronal que las capas profundas de los surcos. Dado el mayor grosor de las capas profundas de los giros, se infiere que existe mayor número de neuronas subyacentes por unidad de superficie en los giros que en los surcos.

Nuestro descubrimiento parecía indicar que las fuerzas físicas que modelaban giros y surcos influían también en la migración neuronal. Conjetura que se ha visto reforzada por estudios del desarrollo fetal en humanos. La migración de neuronas hasta la corteza y el plegamiento de la misma, en vez de producirse de una manera secuencial, se superponen parcialmente en el tiempo. En consecuencia, al plegarse la corteza, la compresión y el estiramiento de las capas pueden afectar al paso de neuronas recién nacidas que migran hasta la corteza tardíamente en el desarrollo, lo cual, a su vez, repercutiría en la composición de la corteza.

Además, las formas de las neuronas difieren entre sí de acuerdo con su lugar de residencia en la corteza. Las neuronas de las capas profundas de los giros se ven comprimidas desde los costados, por lo que ofrecen un aspecto elongado. Las neuronas de las capas profundas de los surcos sufren estiramiento y parecen aplanadas. Las formas de estas células son coherentes con la posibilidad de que hayan sido modificadas por fuerzas mecánicas al plegarse la corteza.

Un problema interesante consistiría en averiguar si las diferencias enunciadas entre neuronas de los giros y neuronas de los surcos influyen o no en la función neuronal.

Las simulaciones informáticas que hemos acometido nos mueven a pensar en una respuesta afirmativa. Puesto que la lámina cortical es más gruesa en los giros que en los surcos, las señales incidentes en las dendritas de neuronas alojadas en el fondo de un giro deben cubrir distancias más largas hasta el soma celular que las señales que llegan a las dendritas de neuronas alojadas en el fondo de un surco. Se podría verificar el efecto de estas diferencias físicas sobre la función neuronal mediante el registro de la actividad de neuronas individuales en un corte transversal del ondulante paisaje cortical. (Nadie ha abordado todavía esa inquisición.)

Plegamientos anómalos

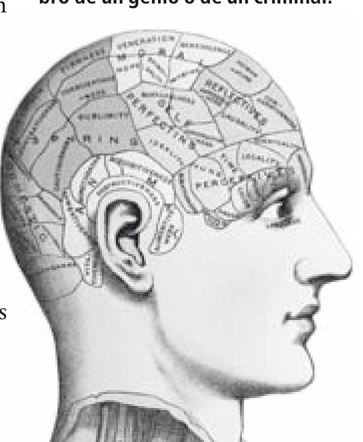
Para comprender la relación entre forma y función, es necesario examinar un número muy alto de cerebros. Contamos ahora con la ventaja de que podemos observar el cerebro humano vivo mediante técnicas no invasivas —la formación de imágenes por resonancia magnética estructural, entre otras— y construir mediante ordenadores vistas tridimensionales. A través de esos medios, se nos permite aco-

Los autores

Claus C. Hilgetag imparte clases de neurociencia en la Universidad Jacobs de Bremen. Se dedica a la neurociencia computacional, con particular énfasis en la conectividad cerebral. **Helen Barbas**, profesora en la Universidad de Boston, centra su trabajo en la corteza prefrontal.

¿RETORNO A LA FRENOLOGIA?

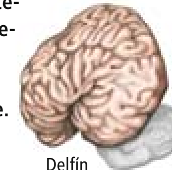
La frenología, popular en el siglo XIX, estudiaba la forma del cráneo para deducir la personalidad y capacidad mental del individuo. Se creía que los abultamientos y depresiones del cráneo se debían a la forma del cerebro, y que cada uno de estos accidentes topográficos se correspondía con una facultad mental. La disciplina acabó arrumbada entre las pseudociencias. Andando el tiempo, sin embargo, se fue estableciendo que la forma del cerebro (y no la forma del cráneo) puede guardar relación con la función o disfunción mental. Empero, están por determinar todavía las configuraciones que permiten discriminar entre un cerebro normal y el cerebro de un genio o de un criminal.

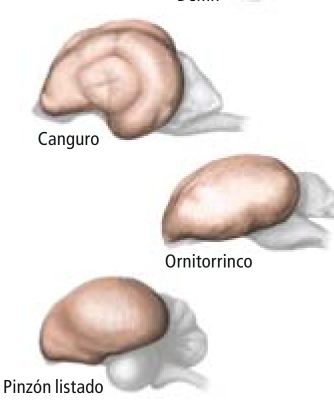


BETTMANN CORBIS

OTROS PAISAJES CEREBRALES

En humanos y en otros grandes mamíferos, la corteza cerebral se halla sumamente plegada. En otros vertebrados, el plegamiento es menor, o inexistente.





Las figuras no están a escala

piar imágenes de muchos cerebros, en cuantía muy superior a las que se obtenían con las colecciones clásicas *post-mortem*. Los investigadores examinan de una manera sistemática las extensas bases de datos creadas, valiéndose de refinados programas informáticos para analizar la forma del cerebro. Uno de los descubrimientos clave ha sido la existencia de diferencias palmarias entre los pliegues corticales de las personas sanas y los de enfermos mentales, que arrancan del desarrollo fetal, en plena formación de neuronas, conexiones y circunvoluciones. La relación mecánica entre conexiones de fibras y circunvoluciones pudiera explicar las desviaciones de la norma.

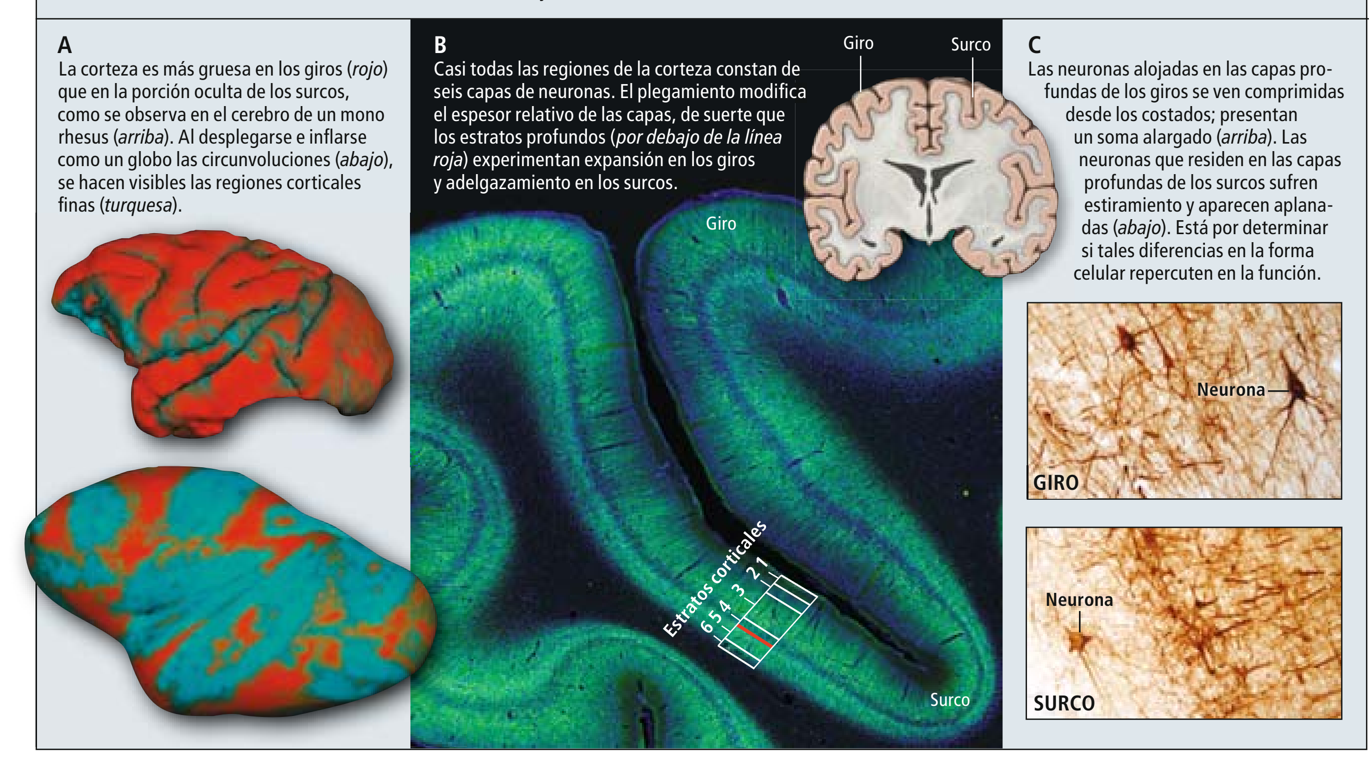
La investigación sobre tales vínculos posibles se encuentra todavía en fase inicial. Pero en el último par de años, desde diversos estudios se ha informado que los cerebros de esquizofrénicos exhiben, en comparación con los de individuos normales, un plegamiento cortical menor. Observaciones no exentas de controversia, habida cuenta de que la ubicación y el tipo de aberraciones del plegado difieren de un sujeto a otro. Mas no cabe duda de que la forma del cerebro esquizofrénico difiere de la configuración del cerebro sano. Los expertos suelen atribuir la esquizofrenia a una perturbación del equilibrio neuroquímico. Los nuevos trabajos sugieren que existe, además, un fallo en la circuitería del sistema cerebral de comunicaciones. La naturaleza del fallo sigue siendo, no obstante, desconocida.

Quienes han sido diagnosticados de autismo exhiben, a su vez, circunvoluciones corticales anómalas. Parece que presentan surcos más profundos y ligeramente desplazados con respecto a los de individuos sanos. A la luz de este hallazgo, se ha empezado a atribuir el origen del autismo a un conexionado cerebral erróneo. Respaldan semejante hipótesis los estudios sobre la función cerebral, que señalan que en autistas se intensifica la comunicación entre áreas corticales próximas, mientras que se debilita la comunicación entre áreas distantes. En consecuencia, a esos pacientes les cuesta prescindir de cosas irrelevantes y centrar la atención en asuntos que la merecen.

Los propios trastornos mentales y las dificultades de aprendizaje pueden hallarse asociadas con aberraciones en la composición de los estratos corticales. Hace unos 30 años, Albert Galaburda, de la facultad de medicina de la Universidad de Harvard, descubrió que, en la dislexia, las neuronas piramidales, que constituyen el sistema principal de comunicación de la corteza cerebral, se encontraban desplazadas de su posición normal en las capas correspondientes a las áreas de la audición y el lenguaje de la corteza frontal. Por su lado, la esquizofre-

MODELADO MECANICO

Las fuerzas físicas modelan numerosos aspectos de la corteza cerebral: desde rasgos macroscópicos, como el espesor de los giros y surcos (*a*), hasta la estructura de los estratos en el seno de la corteza (*b*) y la forma de las neuronas (*c*).



A
La corteza es más gruesa en los giros (*rojo*) que en la porción oculta de los surcos, como se observa en el cerebro de un mono rhesus (*arriba*). Al desplegarse e inflarse como un globo las circunvoluciones (*abajo*), se hacen visibles las regiones corticales finas (*turquesa*).

B
Casi todas las regiones de la corteza constan de seis capas de neuronas. El plegamiento modifica el espesor relativo de las capas, de suerte que los estratos profundos (*por debajo de la línea roja*) experimentan expansión en los giros y adelgazamiento en los surcos.

C
Las neuronas alojadas en las capas profundas de los giros se ven comprimidas desde los costados; presentan un soma alargado (*arriba*). Las neuronas que residen en las capas profundas de los surcos sufren estiramiento y aparecen aplanadas (*abajo*). Está por determinar si tales diferencias en la forma celular repercuten en la función.

JEN CHRISTIANSEN (*cerebros de animales y corte transversal del cerebro*); CORTESIA DE HELEN BARBAS (*micrografías*)

nia puede dejar improntas sobre la arquitectura cortical: algunas áreas frontales de la corteza de individuos afectados muestran una densidad neuronal aberrante. La distribución neuronal anómala en los estratos corticales perturba el patrón de conexiones, lo cual merma la función fundamental del sistema nervioso en la comunicación. Se están empezando a sondear las anomalías estructurales de la corteza de las personas autistas, lo cual puede elucidar más claramente este desconcertante mal.

Serán necesarios más estudios para descubrir si otras enfermedades neurológicas originadas durante la gestación provocan también cambios en el número y posición de neuronas de los estratos corticales. Si se concibieran el autismo y la esquizofrenia como trastornos que afectan a las redes neuronales, y no a secciones locales del cerebro, podrían indagarse nuevas vías de diagnóstico y tratamiento. Los pacientes podrían mejorar realizando tareas en las que intervinieran distintas partes del cerebro, a la manera en que los disléxicos se benefician del uso de ayudas visuales o multimodales en el aprendizaje.

Los métodos modernos de formación de imágenes han permitido someter a prueba la tesis frenológica de que las circunvoluciones cerebrales o la cantidad de materia gris en distintas regiones cerebrales revelan los talentos de una persona. También en este caso, el intento de correlación entre forma y función está plagado de dificultades. La conexión alcanza máxima claridad en personas que se dedican de forma rutinaria a ejercicios físicos y mentales coordinados y bien definidos.

Tenemos un ejemplo en los músicos profesionales, que dedican horas y horas al ejercicio. Sus regiones corticales motoras que intervienen en el control del instrumento musical difieren de las correspondientes en un sujeto normal. Pero sigue resultando elusiva la identificación de configuraciones de plegamiento que distingan talentos mentales de tipo más general.

Variación incómoda

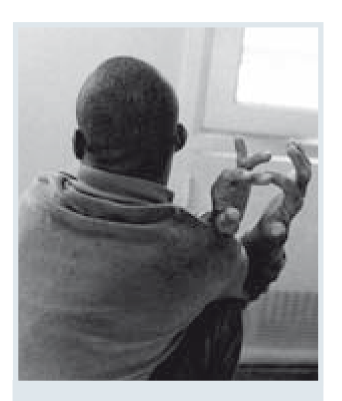
Todavía es mucho lo que se ignora. No sabemos de qué modo alcanza un giro su forma y tamaño, ni conocemos los fenómenos subyacentes que determinan durante la gestación las diferencias morfológicas en las orejas y la nariz de los individuos. El problema de la variación entraña gran complejidad. Los modelos computacionales que simulan la diversidad de interacciones físicas entre neuronas durante el desarrollo cortical pudieran arrojar luz sobre esta cuestión en el futuro. Por ahora, sin embargo, los modelos son muy rudimentarios, debido a la complejidad de las interacciones físicas y a la reducida cantidad de datos disponibles sobre el desarrollo fetal.

Sería de gran importancia ahondar en el desarrollo de la corteza. La lista de nuestros deseos va encabezada por un calendario detallado de la formación de las conexiones, numerosas y diversas, que componen su extenso sistema de comunicación. Mediante la señalización de neuronas en animales, podremos determinar en qué momento se desarrollan en el útero las partes de la corteza, lo cual, a su vez, permitirá la modificación experimental del desarrollo de distintos estratos neuronales. La información sobre la secuencia de desarrollo contribuirá a revelar acontecimientos que causan anomalías en la morfología y función cerebrales. Toda una gama de enfermedades neurológicas de muy distinta sintomatología (esquizofrenia, autismo, síndrome de Williams, epilepsia infantil y otras) puede ser consecuencia de patologías surgidas en distintos momentos del desarrollo, que afecten de diversas formas a regiones, capas y conjuntos de neuronas que se encontraban emergiendo, migrando o conectándose cuando el proceso se desbarató.

Desde luego, las fuerzas mecánicas no son las únicas que modelan el cerebro. La comparación de formas cerebrales ha revelado que éstas guardan entre sí mayor semejanza entre parientes cercanos que entre personas sin parentesco, lo que indica la intervención de programas genéticos. Quizá los procesos genéticos controlen los tiempos de desarrollo de la corteza y las fuerzas físicas den forma al cerebro a medida que las células nerviosas se van generando, migran y se interconectan de acuerdo con un patrón de autoorganización. Tal combinación podría explicar la regularidad de las circunvoluciones principales entre individuos, así como la diversidad de las circunvoluciones pequeñas, que difieren incluso en gemelos idénticos.

Muchos de los conceptos actuales sobre la morfología cerebral son un retorno completo de ideas propuestas hace más de un siglo: entre ellas, la existencia de un vínculo entre la forma y la función. La comparación de la forma del cerebro de individuos normales y de individuos con trastornos mentales lleva a concluir que el paisaje cerebral sí guarda relación con la función, o disfunción, mental.

Pero ni siquiera con los métodos y técnicas de formación de imágenes más avanzados para la medición del cerebro resulta posible determinar si la corteza que vemos corresponde a un genio o a un criminal. Nuevos modelos de plegamiento cerebral, que conjuguen principios físicos y genéticos, nos ayudarán a integrar los conocimientos sobre morfología, desarrollo y conectividad, de modo que podamos acabar despejando el misterio de estos y otros secretos del cerebro.



2. FORMA Y FUNCION. Los pliegues corticales de personas con autismo u otros trastornos mentales surgidos durante el desarrollo fetal difieren de los pliegues de individuos sanos. Es posible que también la composición de sus estratos corticales exhiba aberraciones.

ABRAHAM MENASHE *Photo Researchers, Inc.*

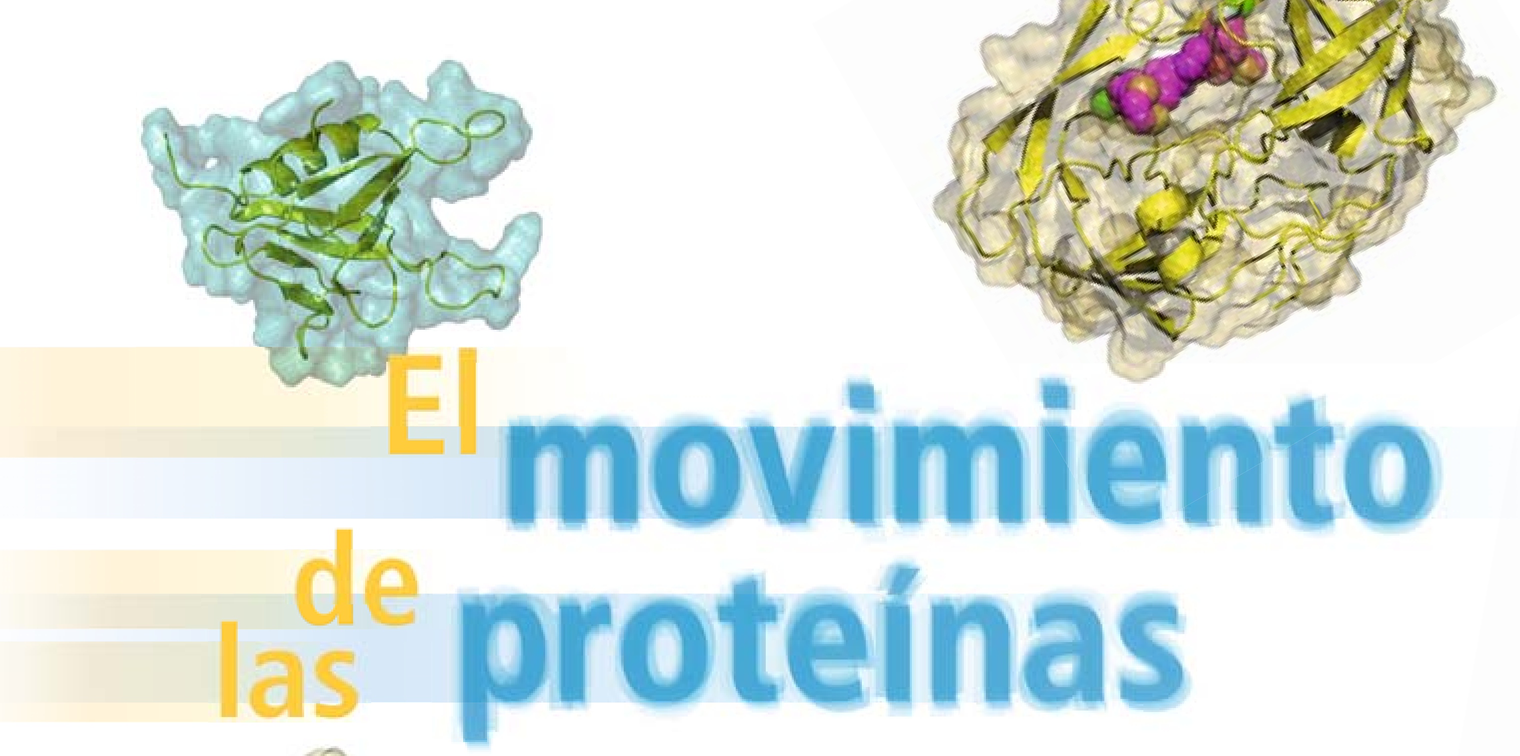
Bibliografía complementaria

ON GROWTH AND FORM. D'Arcy Wentworth Thompson. Reimpresión: Cambridge University Press, 1961. Traducción española, *Sobre el crecimiento y la forma*. Editorial Blume; Barcelona, 1971. También Akal, 2003.

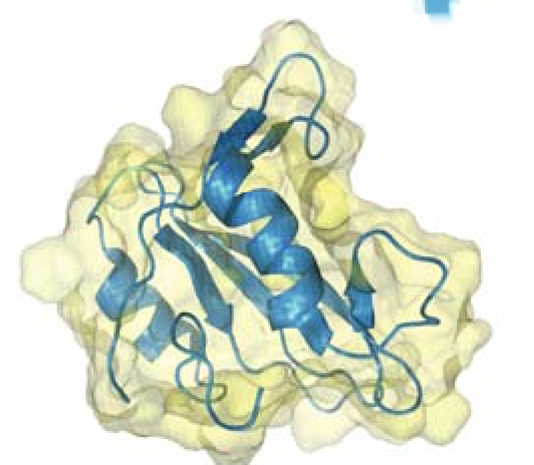
A TENSION-BASED THEORY OF MORPHOGENESIS AND COMPACT WIRING IN THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM. David C. van Essen en *Nature*, vol. 385, págs. 313-318; 23 de enero, 1997.

POSTCARDS FROM THE BRAIN MUSEUM: THE IMPROBABLE SEARCH FOR MEANING IN THE MATTER OF FAMOUS MINDS. Brain Burrell. Broadway, 2005.

ROLE OF MECHANICAL FACTORS IN THE MORPHOLOGY OF THE PRIMATE CEREBRAL CORTEX. Claus C. Hilgetag y Helen Barbas en *PLOS Computational Biology*, vol. 2, n.º 3, pág. e22; 24 de marzo, 2006.



El movimiento de las proteínas



La espectroscopía de RMN arroja luz sobre la compleja dinámica de las proteínas. Revela una estrecha relación entre la flexibilidad molecular y la función biológica

Oscar Millet

CONCEPTOS BASICOS

- Las proteínas son entidades flexibles, movilidad a menudo ligada a la función celular.
- La resonancia magnética nuclear permite estudiar, con resolución atómica, la dinámica de las proteínas y observar fenómenos moleculares que tienen lugar en múltiples escalas de tiempo.
- La comprensión de los fenómenos dinámicos en las proteínas reviste interés para el desarrollo de fármacos.

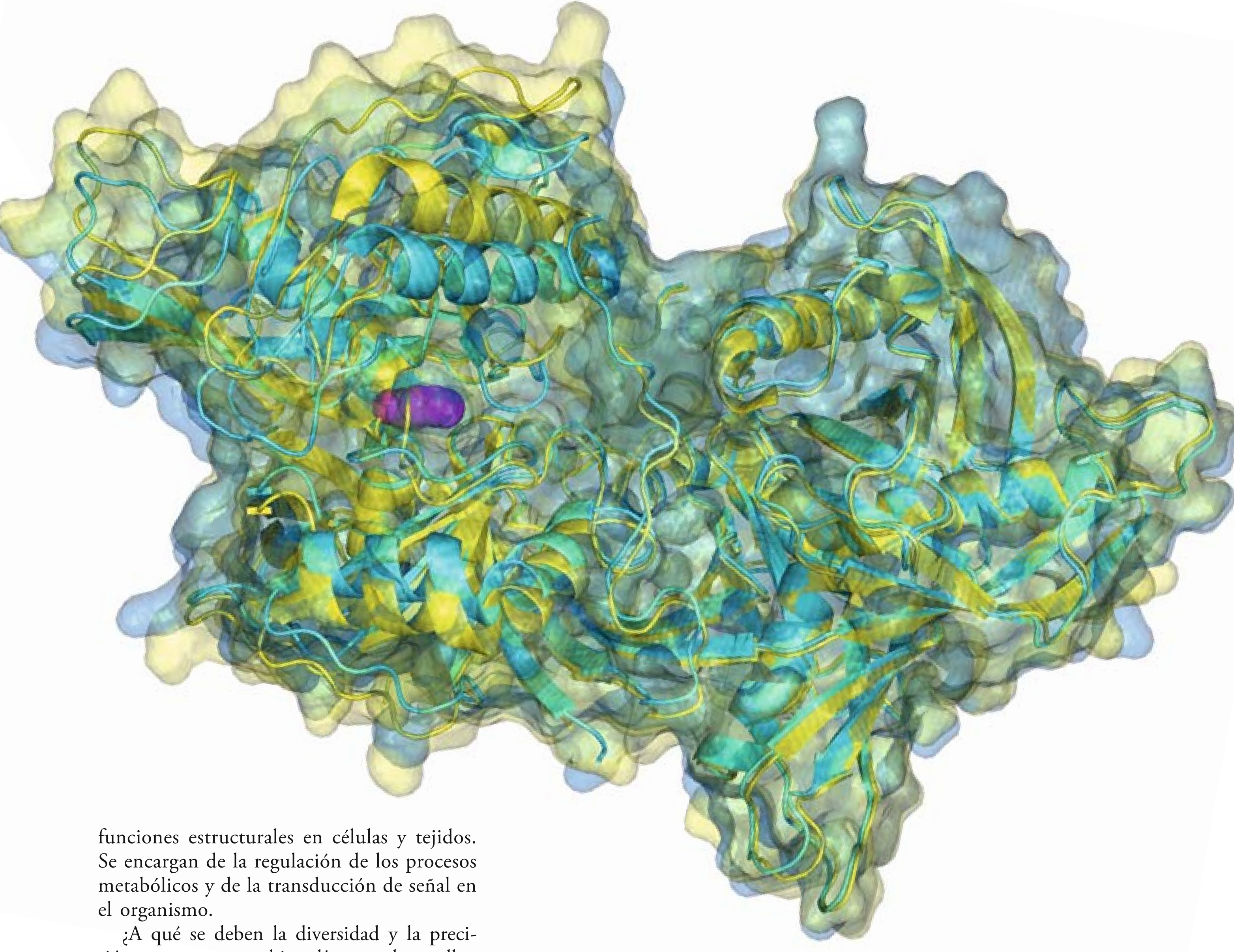
La biología estructural, una de las ramas más dinámicas de la biología contemporánea, se ocupa del estudio de los procesos celulares a nivel molecular. La unidad fundamental de investigación son las macromoléculas, las proteínas sobre todo. Buena parte de la exquisita precisión con que operan las proteínas y enzimas se debe a su plasticidad. Sin embargo, el estudio del movimiento proteínico entraña una notable dificultad. Su relación con la función biológica se encuentra a menudo enmascarada por otros factores.

La resonancia magnética nuclear (RMN) resulta idónea para analizar la movilidad de las biomoléculas; se aplica a la "observación" de fenómenos moleculares que tienen lugar en múltiples escalas de tiempo. Los fundamentos teóricos del estudio de la movilidad conformacional por RMN se conocen desde hace decenios, pero ha sido la reciente introducción de métodos experimentales junto con notables desarrollos técnicos en instrumentación los que han permitido obtener, con resolución atómica, información cualitativa y cuantitativa de procesos dinámicos. Aquí describimos uno de esos métodos, el estudio por RMN del intercambio químico conformacional. A través de ejemplos seleccionados ahondaremos en la capacidad de las técnicas de RMN para obtener información de los procesos celulares.

Plegamientos y reorientaciones

Las proteínas son biopolímeros, constituidos por concatenación de aminoácidos. A partir de veinte aminoácidos se forman, mediante enlaces amida, múltiples combinaciones. Todos los seres vivos (virus incluidos) contienen proteínas; del funcionamiento de éstas y de su adecuada integración en el medio celular depende la subsistencia del organismo.

Proteínas son las enzimas que catalizan las reacciones químicas en un organismo, los receptores que detectan específicamente determinados metabolitos o agentes patógenos, y los canales transmembrana que regulan los gradientes de concentración de iones y otras sustancias a ambos lados de la pared celular. Las proteínas ejercen también



funciones estructurales en células y tejidos. Se encargan de la regulación de los procesos metabólicos y de la transducción de señal en el organismo.

¿A qué se deben la diversidad y la precisión con que estos biopolímeros desarrollan sus funciones? Por una parte, cada uno de los veinte aminoácidos constituyentes (monómeros) presenta características fisicoquímicas singulares, que confieren a cada proteína una reactividad específica. La secuencia aminoacídica (estructura primaria) define las propiedades de la proteína. Las proteínas adoptan espontáneamente una conformación tridimensional (estructura terciaria) que tiene por misión orientar en el espacio a los aminoácidos de interés funcional.

Para ejercer tal abanico de funciones, las proteínas requieren una flexibilidad conformacional notable. Hace medio siglo, tras las primeras determinaciones de estructuras tridimensionales de proteínas, mediante cristalografía de rayos X, se planteó la posibilidad de que en las proteínas se desarrollaran fenómenos de dinámica conformacional. La confirmación de la hipótesis llegaría, años más tarde, con los experimentos de RMN, cuando Gerhard Wagner y Kurt Wütrich, del Instituto Politécnico Federal Suizo en Zúrich, observaron movimientos de rotación en los residuos aromáticos del núcleo hidrofóbico de una proteína globular.

Sabemos ahora que los fenómenos dinámicos en proteínas se manifiestan en distintos niveles. Centrémonos en el equilibrio entre la forma nativa (conformación plegada caracterizada por su estructura terciaria) y la forma desnaturalizada (forma inactiva y carente de estructura definida).

Pese a que la forma nativa es más estable que la desnaturalizada, se trata de una estabilidad marginal, pues equivale a la energía de unos pocos enlaces de puente de hidrógeno. Ambas formas se convierten una en otra constantemente. La conformación nativa debe existir sólo durante el tiempo necesario para cumplir su función; luego, se desnaturaliza a través de un mecanismo de regulación y renovación del material celular.

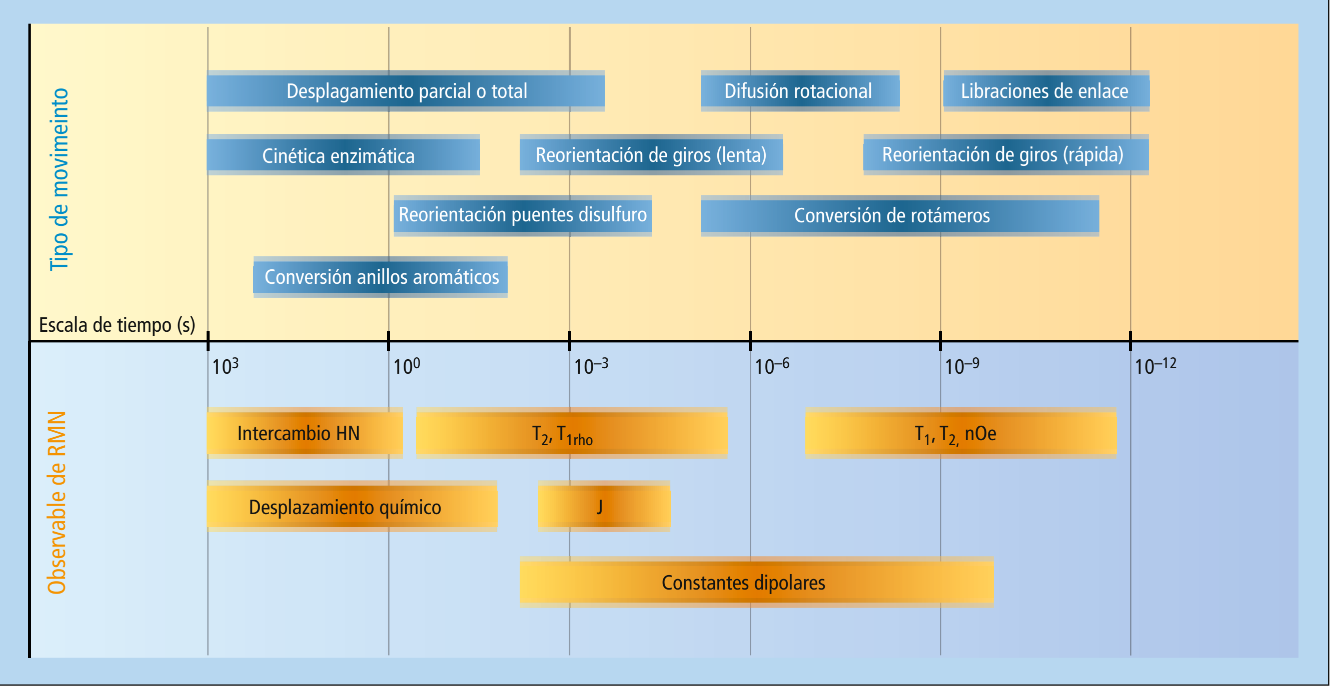
La conversión entre las formas nativa y desnaturalizada sucede a escalas de tiempo que van del milisegundo al segundo. La información necesaria para dicha transformación

1. LA MOVILIDAD DE LAS PROTEINAS reviste suma importancia para su función biológica. La imagen corresponde a la racemasa de prolina, enzima de *Tripanosoma cruzi*, el parásito responsable del mal de Chagas. Se muestra la superposición de dos conformaciones moleculares: abierta (*amarillo*) y cerrada (*azul*). En ausencia de sustrato, la proteína interacciona con nuestro sistema inmunitario de forma que lo desbarata. Cuando se une al centro activo un sustrato (*morado*), la estructura se cierra, lo que evita la acción patógena. Ahondar en el movimiento de esta molécula reviste suma importancia para el desarrollo de fármacos contra esta enfermedad.

LAURA MASGRAU (*ambas páginas*)

MOVIMIENTOS RAPIDOS Y ULTRARRAPIDOS

En las proteínas se producen varios tipos de movimiento: rotaciones de enlaces, plegamientos, libraciones, etcétera. Cada uno ocurre a una escala de tiempo característica. Para estudiar uno de esos movimientos (*barras azules*), deberemos recurrir al "observable" equivalente (*barras naranjas*) en aquella escala de tiempo. (Un "observable" corresponde a una propiedad del sistema que puede determinarse, u "observarse", por una secuencia de operaciones físicas.) Los observables que describen la dinámica de las proteínas se determinan mediante experimentos de RMN.



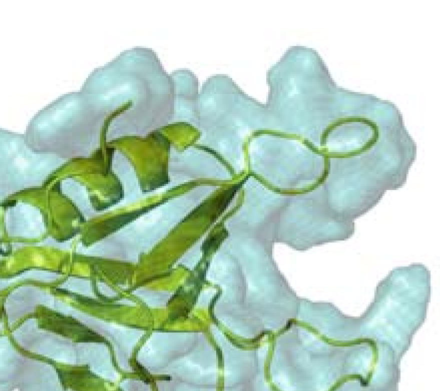
suele ser función exclusiva de la secuencia aminoacídica de la proteína. Esas escalas de tiempo son extraordinariamente pequeñas si las comparamos con el tiempo que necesitaría el polipéptido para tantear todas las conformaciones posibles, lo que se conoce por paradoja de Levinthal. De lo que se infiere que debe de haber cierta direccionalidad en el proceso de plegamiento.

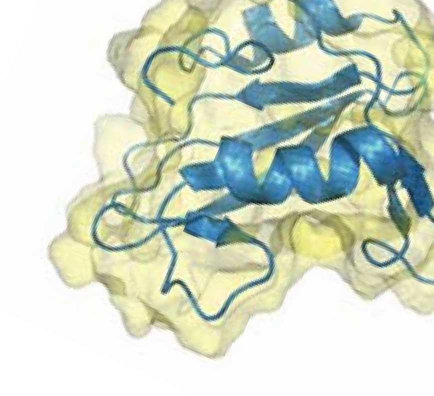
El modelo de plegamiento más aceptado es el del "embudo de plegamiento proteico". De acuerdo con el mismo, los estadios intermedios restringen paulatinamente el espacio conformacional accesible y, de ese modo, encaminan el plegamiento hacia la conformación nativa. El estudio de la dinámica del plegamiento proteínico se lleva buena parte de los trabajos actuales sobre biología estructural.

La estructura nativa no es rígida, sino que experimenta cambios conformacionales, en su totalidad o en segmentos aislados. Aunque se trata de reordenamientos reversibles y no producen la desnaturalización de la proteína, revisten máximo interés biológico. Su posible función quedó ya recogida en una observación pionera de Daniel Koshland en 1958: "...la naturaleza flexible de fragmentos o de la totalidad de la cadena polipeptídica se atribuye a múltiples razones; entre ellas, cambios conformacionales producidos por moléculas de tamaño limitado". Con otras palabras, la interacción con una molécula orgánica puede inducir en la proteína cambios conformacionales que facilitan la creación de un complejo y aumentan la especificidad. Esta hipótesis ha sido ampliamente corroborada experimentalmente mediante RMN de alta resolución y otras técnicas espectroscópicas.

El mecanismo de acción de las enzimas constituye un buen ejemplo de movilidad segmental: una reordenación de átomos en la proteína facilita la adaptación entre ésta y el sustrato. Se esgrimen varias razones para explicar el fenómeno. Se habla, por ejemplo, de grados de libertad, que permitirían a la enzima adoptar conformaciones que se encuentran en la coordenada de reacción y rebajan la energía de activación del proceso. Otro mecanismo posible se basa en un acoplamiento con el sustrato, que iniciaría la reorientación y desencadenaría la reacción enzimática.

También, al hallarse a temperaturas superiores al cero absoluto, todas las moléculas experimentan movimientos y vibraciones de enlace que ocurren a escalas de tiempo muy reducidas. Nos referimos al "movimiento térmico". En el caso de las proteínas, esos movimientos incluyen, entre otros, las vibraciones de enlace (con periodos de femtosegundos) y las rotaciones de las cadenas laterales (con





períodos de picosegundos, si se hallan en la superficie, y nanosegundos, si los residuos son interiores).

El delicado equilibrio entre las componentes entálpica y entrópica explica que el movimiento térmico para residuos distintos no sea independiente. En la dihidrofolatorreductasa y la ciclofilina A, por ejemplo, se ha demostrado un movimiento térmico concertado de un grupo de residuos. Como veremos más adelante, en la ciclofilina A, ese movimiento de "respiración" es el responsable último de la actividad catalítica de la enzima.

RMN biomolecular

La resonancia magnética nuclear se basa en la interacción entre núcleos atómicos y ondas de radiofrecuencia, en presencia de campos magnéticos intensos. En el caso de las proteínas, los núcleos más estudiados mediante esta técnica espectroscópica son el protón (^{1}H), carbono (isótopo ^{13}C) y nitrógeno (isótopo ^{15}N).

En el espectro de RMN monodimensional, el más sencillo, se registran las frecuencias de resonancia de uno de los núcleos que se estudian, el protón (^{1}H), por ejemplo. Se obtiene entonces una serie de señales correspondientes a los protones de la molécula. Las diferencias entre señales provienen de las diferencias entre los *entornos químicos* que rodean a los núcleos en la molécula. El entorno difiere incluso entre núcleos que están tendiendo el mismo tipo de enlaces químicos, con lo que la señal proporciona información estructural de gran valor. La espectroscopía de RMN y la cristalografía de rayos X de alta resolución constituyen las dos técnicas más utilizadas en la elucidación estructural de biomoléculas y las que proporcionan una mayor resolución.

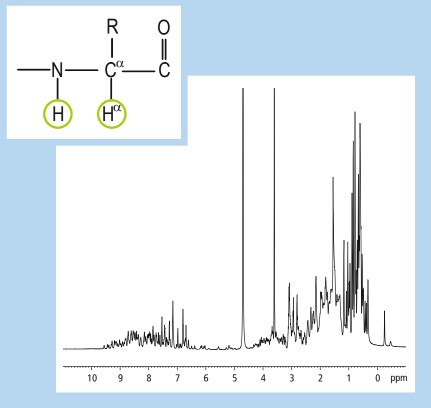
El espectro de RMN de una proteína entraña una complejidad notable, vinculada al solapamiento de señales con el mismo "desplazamiento químico" y al acoplamiento entre señales. Merced al desarrollo de la RMN multidimensional, donde la información correspondiente a distintos núcleos se presenta de manera combinada, se ha registrado un progreso espectacular en el estudio de biomacromoléculas.

En el experimento ^{1}H-^{15}N-HSQC ("Heteronuclear Single-Quantum Correlation bidimensional"), se combinan los desplazamientos químicos de los núcleos de hidrógeno y de nitrógeno. Cada señal que aparece en el plano del espectro corresponde a un grupo N-H vinculado a un residuo de la proteína. La dispersión en el plano basta para resolver la mayoría de las señales. Mediante RMN se han estudiado proteínas de pesos moleculares de hasta 80 kilodalton (Kda) (80.000 g/mol, unos 700 aminoácidos).

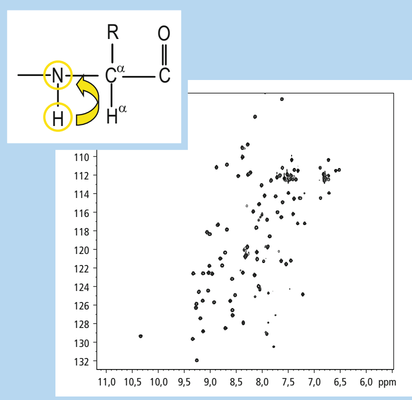
En general, el estudio del ^{1}H-^{15}N-HSQC precede a otros experimentos multidimensionales, de mayor complejidad técnica y concep-

DETERMINACION ESTRUCTURAL MEDIANTE RMN

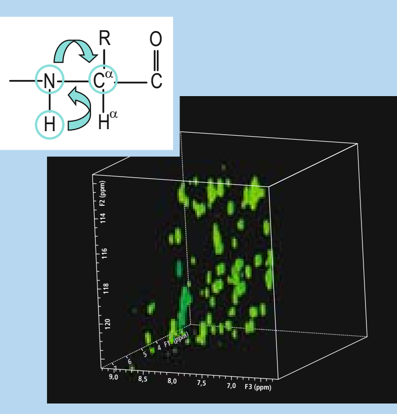
La aplicación de la resonancia magnética nuclear (RMN) a la determinación estructural se basa en la medida del "desplazamiento químico" para cada núcleo atómico. Este parámetro depende del entorno químico que rodea el núcleo en estudio, es decir, de la composición y la conformación de la biomolécula. Las siguientes imágenes muestran ejemplos de espectros de RMN mono, bi y tridimensional junto con un esquema del tipo de interacción química que permiten estudiar. El desarrollo de la RMN multidimensional ha facilitado un progreso espectacular en el estudio estructural de las biomoléculas.



El espectro monodimensional es el más sencillo de registrar y de analizar. Su principal inconveniente es que el solapamiento de bandas de átomos parecidos (*verde*) complica a menudo la interpretación de la señal.



El espectro bidimensional resuelve el problema del solapamiento. Al hacer uso del acoplamiento entre dos núcleos unidos por un enlace (*amarillo*), permite diferenciar entre átomos que la RMN monodimensional no distingue.



El espectro tridimensional añade complejidad técnica y de interpretación de la señal, pero permite estudiar de forma simultánea la interacción entre tres núcleos relacionados (*azul*).

OSCAR MILLET

tual, que permiten asignar las señales relativas a la posición de los núcleos en la proteína.

Captar el movimiento

De la RMN destacamos su capacidad para proporcionar información acerca de procesos dinámicos en un amplio intervalo de escalas de tiempo. Revisten especial interés biológico los procesos que implican un intercambio entre dos conformaciones de la molécula en la escala del microsegundo-milisegundo. Para su caracterización, importa recabar información estructural de ambas conformaciones, así como describir la termodinámica y la cinética del cambio químico.

Supongamos un equilibrio de intercambio entre dos conformaciones, $C_1 \leftrightarrows C_2$, donde C_1 y C_2 representan los dos estados involucrados en el proceso y k_{12} y k_{21} sus respectivas velocidades de conversión (en s^{-1}). La constante cinética de intercambio (k_{int}) se define como la suma de k_{12} y k_{21}. Proporciona una idea del número total de conversiones por unidad de tiempo. Dado que la frecuencia de resonancia de cada núcleo depende de su entorno químico, esperaríamos dos señales (una para cada una de las dos conformaciones), separadas por una diferencia de frecuencias $\Delta\nu$. La presencia de señales adicionales en el espectro evidencia, pues, un intercambio químico conformacional. El análisis de la frecuencia característica de cada señal proporciona información estructural de ambas conformaciones.

Las señales correspondientes a C_1 y C_2 pertenecen a dos estados del mismo núcleo. Dado que la integral total debe conservarse, la intensidad de cada señal disminuirá en función de las poblaciones relativas de cada confórmero en el equilibrio. Los procesos de intercambio conformacional suelen corresponder a transiciones entre un estado fundamental y un estado excitado escasamente poblado (población inferior al 1 por ciento). En esos casos, la señal del estado excitado apenas se detecta; el espectro no difiere del que correspondería a un sistema sin intercambio conformacional, lo que constituye una limitación del método.

Las condiciones en las que se observan dos señales distintas, una para C_1 y otra para C_2, se dan sólo cuando el intercambio es lento, es decir, cuando los valores de k_{int} son inferiores a la diferencia de frecuencias entre las dos conformaciones ($k_{int} << 2\pi\Delta\nu$). Si el intercambio es rápido ($k_{int} > 2\pi\Delta\nu$), no es posible resolver ambas frecuencias; el espectro muestra una señal, única, cuya frecuencia de resonancia corresponde al valor promedio de las dos conformaciones, con la consiguiente dificultad para identificar los procesos de intercambio químico subyacentes.

Esas dificultades para la identificación y caracterización de los procesos de intercambio químico se han superado merced al desarrollo de secuencias de pulsos que cuantifican el ensanchamiento de la señal. (Y no la frecuencia de resonancia o el desplazamiento químico. La anchura de banda también se ve modificada por la presencia de procesos de intercambio químico.) En esos experimentos de relajación-dispersión, se mide la envolvente de la señal (anchura de la banda) a tiempos de evolución distintos. La conversión de C_1 en C_2 implica un intercambio de frecuencias, lo que comporta una interferencia destructiva, que resulta en la atenuación, o ensanchamiento, de la señal. Cuanto mayor es el tiempo de coexistencia entre las dos frecuencias, mayor es la probabilidad de interconversión (probabilidad que viene dada por k_{int}) y más ancha la señal obtenida. La representación de la evolución temporal de las anchuras de banda proporciona las curvas de dispersión.

El ajuste matemático de las curvas de dispersión proporciona una descripción del equilibrio conformacional. Por un lado, se obtiene la velocidad del proceso (k_{int}); este parámetro guarda relación directa con la barrera energética que separa los dos estados: el sustrato y el producto en una enzima, o el estado fundamental y el excitado en el caso de otra proteína. Por otro, se determinan los desplazamientos químicos de ambas conformaciones, que contienen valiosa información estructural. Se obtienen también las poblaciones relativas de los dos estados; a partir del análisis de

2. LABORATORIO DE RMN DEL CICbioGUNE (Bilbao), dedicado a la biología estructural de proteínas. Se muestran los imanes superconductores (*izquierda y centro*) y la sala de control (*derecha*).

CICbioGUNE, BILBAO

una sola señal, se deducen las poblaciones de ambos confórmeros, incluso en el caso de que la señal de uno de ellos sea muy pequeña. Se han detectado conformaciones con poblaciones de un exiguo 0,5 por ciento.

El experimento básico de medición de la dispersión en proteínas lo llevó a cabo el grupo de Arthur G. Palmer, de la Universidad de Columbia, en 1998. Desde entonces se ha venido depurando la técnica. Se han publicado numerosas aplicaciones. Dos de ellas se detallan a continuación.

Mecanismo catalítico de la ciclofilina A

La ciclofilina A (CypA) pertenece a una familia de prolil-isomerasas que catalizan la isomerización *cis-trans* de enlaces en péptidos y proteínas, siempre que contengan el aminoácido prolina. Participa en importantes procesos celulares —activación de linfocitos T en el sistema inmunitario, por ejemplo— y cumple funciones de chaperona molecular, es decir, asiste al plegamiento de otras proteínas recién formadas. La CypA constituye el receptor natural de la ciclosporina A (CsA), un fármaco inmunosupresor. Desempeña una función esencial en el mecanismo de acción del virus de inmunodeficiencia adquirida (VIH-1): se une al virus a través de la proteína gag y afecta a la generación de copias de la proteína de la cápside Vpr.

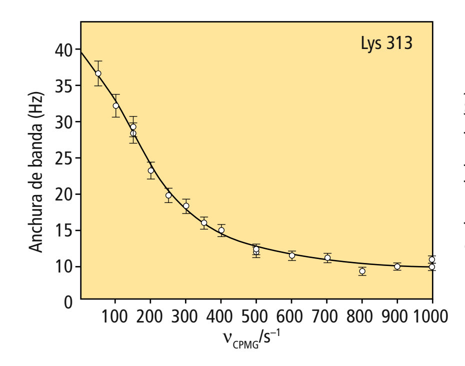
Esta enzima presenta un elevado grado de reversibilidad en la reacción de isomerización. Opera, pues, con velocidades semejantes en ambas direcciones. Los valores de las constantes de interconversión son del mismo orden de magnitud: 1049 s^{-1} para la conversión del isómero *cis* en *trans* (k_{ct}) y 1640 s^{-1} para el proceso inverso (k_{tc}). La unión de CsA a CypA, muy fuerte, con una constante de disociación del complejo CypA/CsA de 30 μM (micromolar). En presencia de un exceso de ciclosporina A, la población de enzima libre puede considerarse despreciable, y decimos que se produce la saturación de la enzima. Ambas formas, *cis* y *trans*, son a la vez sustrato y producto de la enzima. La saturación de la enzima conlleva la generación de un estado estacionario en el que las formas *cis* y *trans* se transforman entre sí indefinidamente; ambas conformaciones se encuentran casi equipobladas.

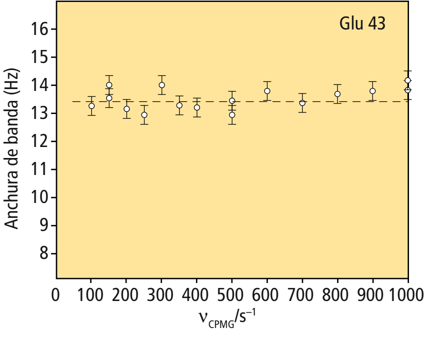
Mediante experimentos de RMN, se ha estudiado la dinámica enzimática de CypA en presencia de CsA, así como la relación entre este movimiento y la función biológica. A partir de las curvas de dispersión se ha determinado el ensanchamiento de la señal inducido por el intercambio químico conformacional, para cada grupo amida de cada aminoácido de la proteína. Los resultados demuestran que la mayoría de los aminoácidos no se hallan implicados en procesos dinámicos; sólo un grupo de 30 residuos presenta una flexibilidad conformacional notable. Los aminoácidos de ese subgrupo se apiñan en el centro activo de la proteína y en ciertos residuos periféricos.

La mayoría de los grupos amida proporcionan valores de intercambio químico (k_{int}) muy similares en la escala de tiempo de la fluctuación; ello sugiere que siguen un movimiento concertado. El valor conjunto obtenido para k_{int} (2500 ± 220 s^{-1}) encaja con la suma de las constantes enzimáticas k_{ct} y k_{tc} (2689 s^{-1}). Esos resultados, junto con el análisis de proteínas mutantes, demuestran que el movimiento de los residuos implicados resulta crítico para la actividad catalítica de la enzima y que el valor de la velocidad máxima de la enzima ($k_{ct} + k_{tc}$) corresponde al tiempo necesario para que los residuos cambien de la conformación *cis* a la *trans*.

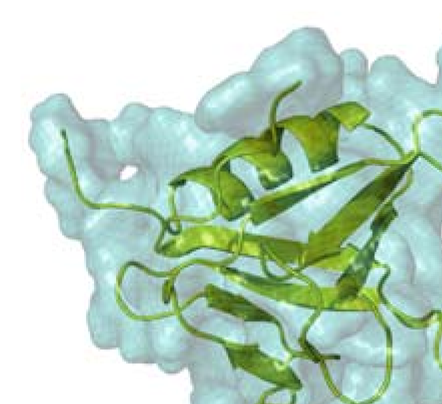
Los experimentos de dispersión demuestran que el movimiento conjunto de un grupo de aminoácidos es el responsable último de la acción enzimática en la ciclofilina. Bajo una apariencia caótica, esas fluctuaciones térmicas establecen la estereoselectividad necesaria para ejecutar la catálisis enzimática con una precisión exquisita. ¿De qué modo se produce la sincronización del movimiento de ese grupo de aminoácidos? La respuesta se encuentra en la arquitectura molecular de la enzima: la evolución ha moldeado la disposición espacial de este grupo de átomos de forma que aparezca el movimiento concertado en situación de equilibrio.

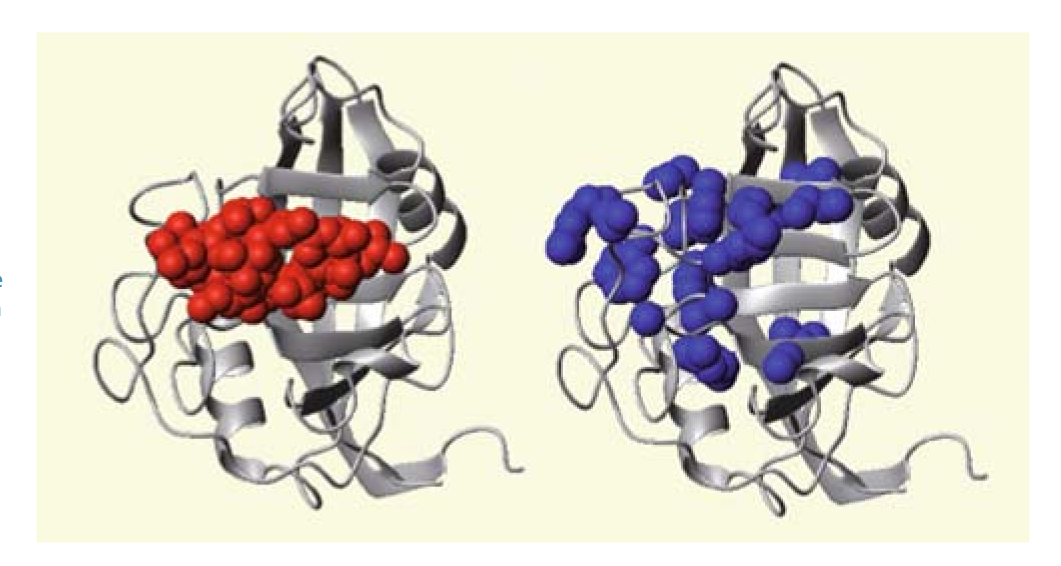
Con el propósito de averiguar la función que desempeña el sustrato en la activación del proceso, se han medido las curvas de dispersión en ausencia de sustrato. Se han descubierto equilibrios conformacionales, en la misma escala de tiempo, que afectan aproximadamente al mismo grupo de aminoácidos. De la investigación se desprende que la ciclofilina A no necesita el sustrato para llevar a cabo su actividad, sino que desarrolla su función catalítica a través del movimiento tér-





3. EN LOS EXPERIMENTOS DE RELAJACION-DISPERSION se mide la anchura de banda a diferentes tiempos de interferencia (representados aquí como frecuencias). Se muestran los resultados obtenidos para dos aminoácidos de la proteína que se une a la maltosa. La lisina 313 muestra una curva de dispersión característica. Del ajuste de los datos experimentales se extrae información sobre la movilidad del aminoácido. El aminoácido glutámico 43, en cambio, no muestra ninguna respuesta diferencial con respecto al tiempo de interferencia; ello indica que no experimenta ningún proceso de intercambio químico conformacional.





4. LA CICLOFILINA A (*gris*) constituye el receptor natural de la ciclosporina A (*rojo*). Se muestran también los átomos involucrados en procesos de intercambio químico conformacional (*azul*). Los experimentos de RMN demuestran una correlación entre la dinámica de la ciclofilina A y el sitio de unión a la ciclosporina.

OSCAR MILLET

mico de un fragmento activo de la proteína. Se trata de un mecanismo complementario a otros modos de catálisis enzimática, como el encaje inducido.

La comparación de los valores obtenidos en ambos experimentos revela que las características dinámicas de la enzima en estado de reposo (en ausencia de sustrato) y en estado activo (cuando procesa el sustrato) no son idénticas.

En ausencia de sustrato, la enzima opera con una k_{int} del orden de 1140 ± 200 s^{-1}; en condiciones de saturación de sustrato, la constante cinética de intercambio alcanza los 2500 s^{-1}. Tal discrepancia síguese de las diferencias en la distribución de la población molecular. En el estado de reposo, alrededor de un 10 por ciento de la población se encuentra en la forma *trans* y un 90 por ciento en la forma *cis*; en presencia de elevadas concentraciones de CsA, en cambio, las poblaciones de ambos confórmeros se acercan al 50 por ciento. El estado de reposo establece, por tanto, la direccionalidad del proceso biológico —favorable a la transformación de *cis* en *trans*—, mientras que la maquinaria catalítica cataliza ambos procesos con rendimientos equiparables.

Detección de estados excitados

La conformación nativa de una proteína se caracteriza por un corazón, o núcleo hidrofóbico, en donde las cadenas laterales se hallan densamente empaquetadas con el fin de maximizar las interacciones no covalentes entre los aminoácidos. Dada la complejidad de la estructura, el empaquetamiento sólo puede predecirse —y de manera aproximada— a partir de métodos computacionales. El diseño de proteínas mutantes con cavidades que puedan alojar moléculas constituye un reto para la ingeniería de proteínas y reviste interés farmacológico. Pero existe un grave inconveniente: la proteína recombinante tiende a colapsarse sobre sí misma para eliminar el volumen adicional.

La lisozima T4 constituye la excepción. Proteína bacteriolítica de dos dominios, la encontramos en tejidos humanos y animales. Los trabajos presentados en 1992 por el grupo de Brian Matthews, de la Universidad de Oregón, descubrieron que una sola mutación en el núcleo de la lisozima T4 (leucina 99 por alanina: L99A) es suficiente para generar una cavidad de 150 angstrom cúbicos. La estructura cristalográfica de la proteína mutante confirma que la cavidad no distorsiona la arquitectura molecular, pese a hallarse enterrada a siete angstrom de la superficie. Y lo que es más, se revela capaz de alojar en su interior ligandos de tamaño reducido e hidrofóbicos (benceno, por ejemplo).

La estabilidad de la cavidad sugiere la existencia de una fuerza repulsiva entre los aminoácidos que la componen. Además, según los datos estructurales, la cavidad no daría entrada a una molécula de tamaño reducido; se requiere una segunda conformación "abierta" por donde la molécula penetraría. Experimentos de unión de xenón a la lisozima T4-L99A han revelado que la unión transcurre en torno a la escala de tiempo del milisegundo.

La dinámica de la cavidad de la lisozima T4 ha sido estudiada por Lewis E. Kay y su grupo, de la Universidad de Toronto, mediante técnicas de RMN de relajación-dispersión. Se ha monitorizado el comportamiento de los grupos amida y metilo de la proteína. A una temperatura de 25 ºC, más de la mitad de los aminoácidos que forman la proteína muestran cierta flexibilidad: todos los residuos que se hallan orientados hacia la cavidad, numerosos residuos del dominio que contiene la mutación e incluso aminoácidos que se encuentran en el otro dominio. La existencia de un movi-

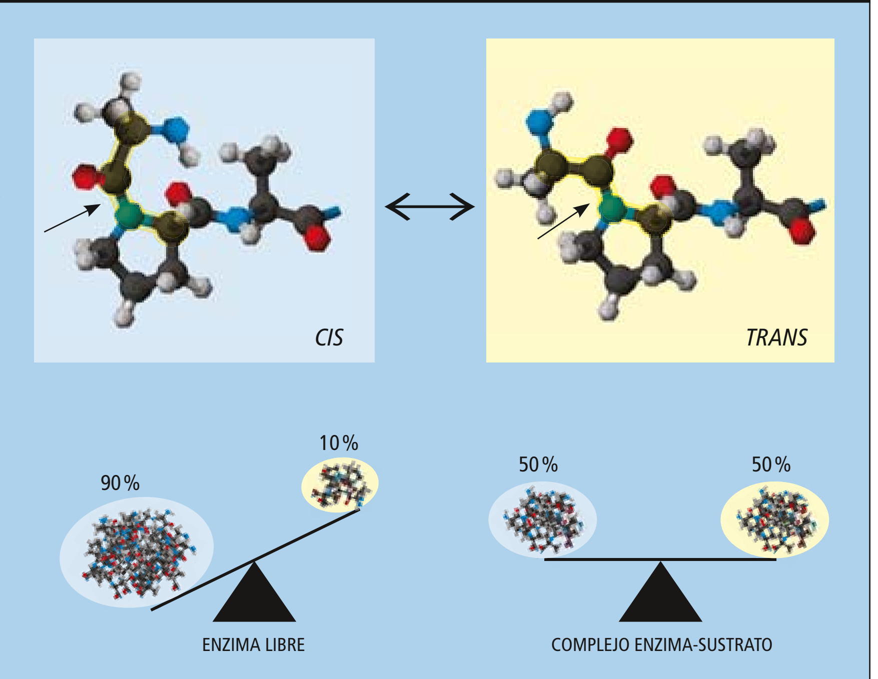
El autor

Oscar Millet es investigador del laboratorio de RMN de proteínas del Centro de Investigación Cooperativa en Biociencias bioGUNE. Realizó su tesis doctoral en la Universidad de Barcelona y completó su formación con una estancia posdoctoral en la Universidad de Toronto.

AMINOACIDOS SINCRONIZADOS

El aminoácido **prolina**, al ser cíclico, presenta isomería geométrica. Puede adoptar dos conformaciones, que se distinguen por la orientación de los residuos respecto del enlace peptídico (*flecha*): *cis* (residuos en el mismo lado) y *trans* (residuos en lados opuestos). A la derecha, el equilibrio *cis-trans* del péptido alanina-prolina-alanina (ALA-PRO-ALA).

La **ciclofilina A** (CypA) es una enzima que participa en numerosos procesos celulares de importancia máxima. Cataliza la isomerización *cis-trans* de enlaces en péptidos y proteínas que contienen **prolina**. Presenta un equilibrio entre dos conformaciones, que reconocen específicamente a las formas *cis* y *trans* del péptido respectivamente. En ausencia de sustrato, la enzima presenta un equilibrio *cis-trans* desplazado hacia la forma que se une a la conformación *cis* de la prolina; en presencia de sustrato, en cambio, ambas conformaciones son equiprobables.



Los experimentos de RMN indican que el responsable último de la dinámica enzimática de la CypA es el **movimiento concertado de un grupo de aminoácidos**, una sincronización que se produce en situación de equilibrio. Es decir, que la CypA no necesita el sustrato para llevar a cabo su actividad, sino que desarrolla su función catalítica a través del movimiento térmico de un fragmento activo de la proteína.

OSCAR MILLET

miento concertado se ha corroborado tras la comparación de los valores de k_{int}.

A diferencia de la proteína nativa, en la proteína mutante L99A los grupos flexibles oscilan entre el estado fundamental (esencialmente idéntico al de la proteína sin la mutación) y un estado excitado (de naturaleza desconocida), accesible al ligando. La población del estado excitado se cifra en torno al 3 por ciento, "invisible" a los experimentos estándar de resonancia magnética nuclear y de cristalografía de rayos X.

Con el fin de caracterizar la naturaleza del estado excitado se han repetido las mediciones de dispersión a una serie de temperaturas que oscilan entre los 10 ºC y los 30 ºC. Se han analizado los resultados de forma conjunta. Al incluir en el estudio el factor térmico, se han determinado las poblaciones del estado excitado a cada temperatura y extraído las componentes entrópica y entálpica.

Las conclusiones del análisis revelan que el estado excitado corresponde a una estructura más desordenada que el estado fundamental: existen menos interacciones y los aminoácidos presentan mayor movilidad. Una movilidad que se concentra en las zonas afectadas por el intercambio químico. Pero el desorden local observado en el estado excitado no desemboca en la desnaturalización completa de la proteína. Lo impide una compensación entrópico-entálpica: la mayor libertad conformacional de las cadenas laterales compensa, en parte, la pérdida de estabilidad que produce la disminución del número de interacciones no covalentes.

Una mirada hacia el futuro

Una silenciosa revolución en el campo de la RMN ha acelerado el desarrollo de nuevos métodos para el estudio del intercambio químico conformacional en la escala de los microsegundos y milisegundos. Dada la íntima, y compleja, relación entre la flexibilidad conformacional y la función biológica, a los métodos de dispersión por RMN les espera un futuro prometedor en la caracterización molecular de procesos celulares: intermedios de plegamiento, proteínas mal plegadas (así, la proteína β-amiloide y su relación con la enfermedad de Alzheimer) y las interacciones proteína-proteína y proteína-ADN.

Una comprensión más honda de la componente entrópica de la dinámica de las proteínas facilitará el diseño de fármacos selectivos y el escalado de enzimas para su uso industrial. Por fin, la integración de la información de los experimentos de dispersión con otros experimentos sensibles a fenómenos ultrabreves arrojará luz sobre otros procesos dinámicos que ocurren en las proteínas.

Bibliografía complementaria

STUDYING EXCITED STATES OF PROTEINS BY NMR SPECTROSCOPY. Frans A. Mulder, Anthony Mittermaier, Bin Hon, Frederick W. Dahlquist y Lewis E. Kay en *Nature Structural Biology*, vol. 8, pág. 932; noviembre, 2001.

NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE METHODS FOR QUANTIFYING MICROSECOND TO MILLISECOND MOTIONS IN BIOLOGICAL MACROMOLECULES. Arthur G. Palmer, Christopher D. Kroenke, Patrick J. Loria en *Methods in Enzymology*, vol. 339, pág. 204; diciembre, 2001.

INTRINSIC DYNAMICS OF AN ENZYME UNDERLIES CATALYSIS. Elan Z. Eisenmesser, O. Millet, W. Labeikovsky, D. Korzhnev, M. Wolf, D. Bosco, J. Skalicky, L. Kay y D. Kern en *Nature*, vol. 438, pág. 117; 3 de noviembre, 2005.

ALIMENTACION Y EFECTO INVERNADERO

La producción de carne de vacuno para consumo humano acarrea unos costes ambientales sorprendentes: la liberación de cantidades ingentes de gases de invernadero

Nathan Fiala

La mayoría somos conscientes de que los automóviles, la energía eléctrica generada por carbón y las fábricas de cemento perjudican el medio. Los alimentos que comemos, en cambio, se habían mantenido hasta hace poco al margen del debate ambiental. Sin embargo, según un informe de 2006 de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), los componentes de nuestra dieta y, en concreto, la carne, arrojan más gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, etcétera) a la atmósfera que el transporte o la industria.

Los gases de efecto invernadero captan energía solar y calientan la superficie terrestre. Dado que la potencia de efecto invernadero varía de un gas a otro, el efecto invernadero de un gas se expresa en términos de "equivalentes de CO_2", es decir, la cantidad de dióxido de carbono necesaria para producir un calentamiento global equivalente.

Según el informe de la FAO, los niveles actuales de producción de carne suponen entre un 14 y un 22 por ciento de los 36.000 millones de toneladas del "equivalente de CO_2" de gases de efecto invernadero que se producen anualmente en el mundo. La producción de una hamburguesa de casi 1/4 kg para un almuerzo (un trozo de carne del tamaño de dos barajas de cartas) libera a la atmósfera la misma cantidad de gases de invernadero que la circulación de un coche de 1400 kg a lo largo de 15 kilómetros.

Todos los alimentos que consumimos, verdura y fruta incluidas, conllevan costes ambientales ocultos: transporte, refrigeración y combustible para el cultivo, así como emisiones de metano de plantas y animales. Todo ello provoca una acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Tomemos por botón de muestra los espárragos: en un informe elaborado para la ciudad de Seattle, el grupo encabezado por Daniel J. Morgan, de la Universidad de Washington, descubrió que cultivar en Perú 1/4 kg de esa hortaliza acarrea la emisión de gases de invernadero equivalentes a 35 g de CO_2 (resultado de la aplicación de insecticidas y abonos, del bombeo de agua y del uso de maquinaria agrícola pesada y de alto consumo de gasolina). Refrigerar y transportar las verduras hasta una mesa norteamericana genera el equivalente a otros 60 g de CO_2 de gases de invernadero. En total, 95 g de equivalentes de CO_2.

Pero eso no es nada comparado con la carne de vacuno. En 1999, Susan Subak, entonces en la Universidad de East Anglia, descubrió que, según el tipo de explotación ganadera, las vacas emitían entre 70 y 135 g de metano por cada 450 g de carne de vacuno que producían. Dado que el metano tiene unas 23 veces el potencial de calentamiento global del CO_2, esas emisiones equivalen a liberar a la atmósfera entre 1,6 y 3 kg de CO_2 por cada 450 g de carne de vacuno producida.

El engorde del ganado demanda gran cantidad de comida por unidad de peso

CONCEPTOS BASICOS

- La producción de vacuno genera gases de invernadero que contribuyen trece veces más al calentamiento global que los gases emitidos por la producción de pollo. En el caso de las patatas el factor es 57.
- El consumo de carne de vaca crece a un ritmo vertiginoso debido al crecimiento de la población y al aumento del consumo de carne per cápita.
- La producción de la dieta media anual de carne de vaca de un estadounidense emite la misma cantidad de gases de invernadero que la circulación de un coche a lo largo de más de 110 km.

corporal. En 2003, Lucas Reijinders, de la Universidad de Amsterdam, y Sam Soret, de la Universidad de Loma Linda, estimaron que para producir 1/4 kg de proteína de carne de vaca son necesarios 4,5 kg de proteína vegetal, con todas las emisiones de gases de invernadero que conlleva el cultivo de cereal. Por último, las granjas producen abundantes residuos que dan origen a gases de efecto invernadero.

Teniendo en cuenta esos factores, Subak calculó que la producción de 1/4 kg de carne de vaca en una explotación intensiva, o CAFO (por sus siglas en inglés), genera el equivalente a unos 6,5 kg de CO_2; más de 36 veces el equivalente de CO_2 de gases de invernadero que emite la producción de espárragos. Ni siquiera otras carnes de consumo igualan el impacto de la de vacuno: la producción de 450 g de carne de cerdo genera el equivalente a 1,7 kg de CO_2; 450 g de pollo el equivalente a 1/2 kg de CO_2. Y aunque el sistema CAFO, económicamente eficiente, no sea el método de producción más limpio en cuanto a emisiones de equivalentes de CO_2, sí es mejor que la mayoría. Los datos de la FAO indican que el promedio mundial de emisiones por la producción de 1/2 kg de carne de vacuno es varias veces superior al del sistema CAFO.



Soluciones

¿Qué medidas tomar? La mejora de la gestión de residuos y de las prácticas de cultivo reduciría la "huella de carbono" de la producción de carne de vaca. Mediante los sistemas de captación de metano, por ejemplo, se generaría electricidad a partir del estiércol. Pero esos sistemas resultan todavía demasiado caros para convertirse en opciones comercialmente viables.

Todos podemos reducir los efectos de la producción de alimentos en el clima global. Hasta cierto punto, podemos elegir nuestra dieta. Una elección más sabia marcaría la diferencia. El consumo de alimentos de producción local, por ejemplo, reduce la necesidad de transporte; si bien, el transporte ineficiente de alimentos, mediante camiones que llevan cantidades limitadas desde explotaciones cercanas, puede resultar en un ahorro de emisiones de gases de invernadero sorprendentemente bajo. También podría reducirse el consumo de carne, sobre todo de vacuno, en EE.UU. y en el resto del mundo desarrollado.

Las gráficas del artículo detallan las conexiones entre la producción de carne de vaca y la emisión de gases de invernadero. La lección es clara: si de verdad queremos limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, debemos reflexionar sobre nuestra dieta y sus consecuencias para el planeta.

El autor

Nathan Fiala prepara su doctorado en economía en la Universidad de California en Irvine. Su tesis aborda el impacto ambiental de los hábitos alimentarios. También evalúa proyectos de desarrollo para el Banco Mundial en Washington, D.C.

¿Hamburguesa o tofu?

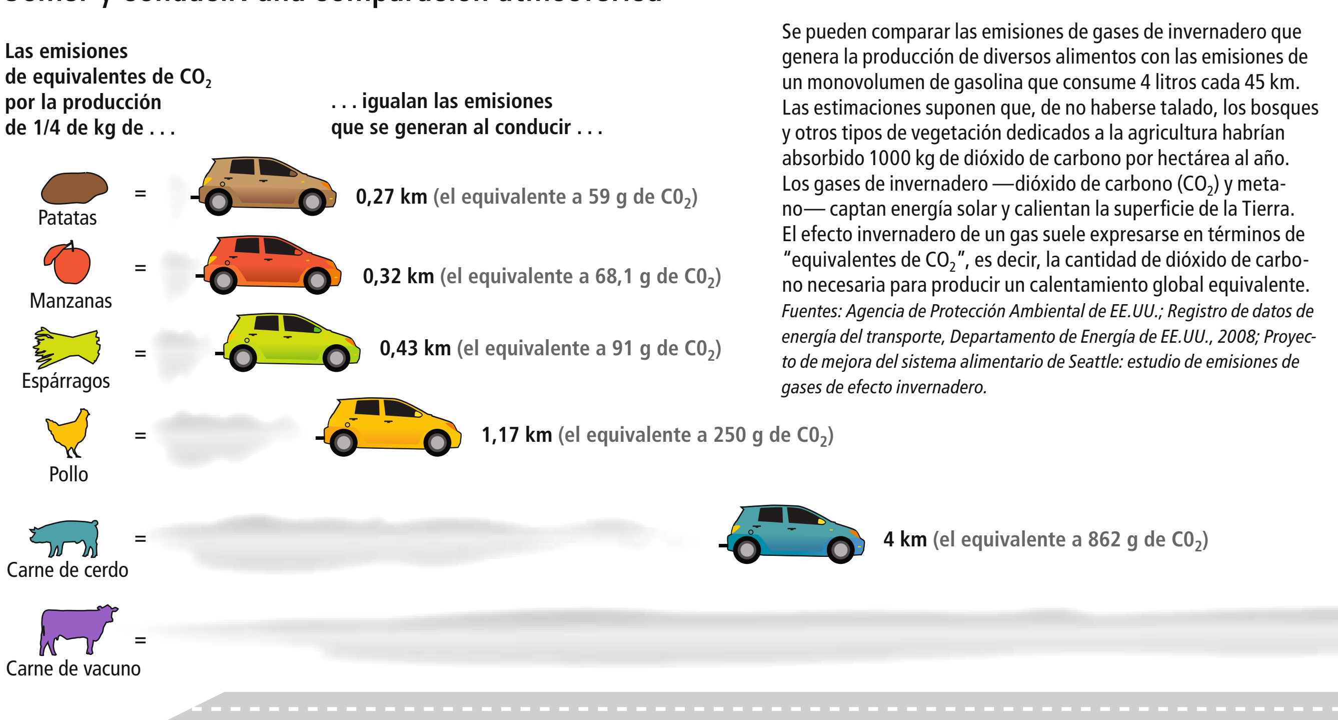
El consumo anual de carne de vacuno per cápita varía entre países: desde los 55 kg de Argentina y los 42 kg de EE.UU. hasta los 450 g de Moldavia; el promedio es de 10 kg por persona y año. Los colores de los países y las distorsiones de su forma reflejan la diferencia entre el consumo de vacuno per cápita del país y el promedio mundial. El consumo mundial de carne de vacuno per cápita está creciendo, sobre todo en Asia, debido al desarrollo económico: conforme aumentan sus ingresos, la gente compra alimentos que considera más deseables.
Fuente: ONU, FAO, 2003

Consumo de carne de vacuno
(kg por persona y año)

- 0–1,4
- 1,4–4
- 4–6,8
- 6,8–18,8
- 18,8–22,7
- 22,7–31,7
- más de 31,7
- Sin datos

Comer y conducir: una comparación atmosférica

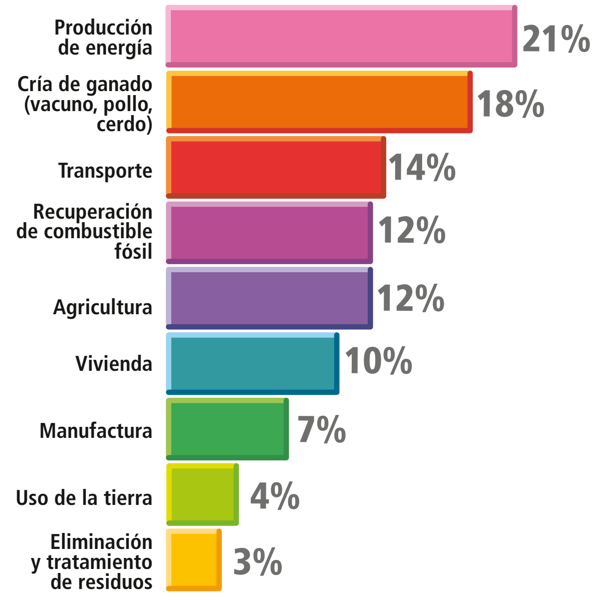
Se pueden comparar las emisiones de gases de invernadero que genera la producción de diversos alimentos con las emisiones de un monovolumen de gasolina que consume 4 litros cada 45 km. Las estimaciones suponen que, de no haberse talado, los bosques y otros tipos de vegetación dedicados a la agricultura habrían absorbido 1000 kg de dióxido de carbono por hectárea al año. Los gases de invernadero —dióxido de carbono (CO_2) y metano— captan energía solar y calientan la superficie de la Tierra. El efecto invernadero de un gas suele expresarse en términos de "equivalentes de CO_2", es decir, la cantidad de dióxido de carbono necesaria para producir un calentamiento global equivalente.
Fuentes: Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.; Registro de datos de energía del transporte, Departamento de Energía de EE.UU., 2008; Proyecto de mejora del sistema alimentario de Seattle: estudio de emisiones de gases de efecto invernadero.



MAPPING SPECIALISTS (*mapa*); LUCY READING-IKKANDA (*ilustraciones*)

El alto coste (en gases de invernadero) de la carne

La producción mundial de carne (vacuno, pollo o cerdo) emite a la atmósfera una cantidad de gases de efecto invernadero mayor que todos los medios de transporte mundial o todos los procesos industriales. Según los datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la base de datos sobre Emisiones para la Investigación Atmosférica Mundial, se estima que los niveles actuales de producción de carne arrojan anualmente a la atmósfera el equivalente a unos 6500 millones de toneladas de CO_2 de gases de efecto invernadero: el 18 por ciento de los 36000 millones de toneladas anuales de emisiones mundiales de gases de invernadero. Sólo la producción de energía genera mayor cantidad de gases de invernadero que la cría de ganado para el consumo.
Fuente: FAO ONU, 2006



El total supera el 100 % debido a los redondeos



Un apetito creciente

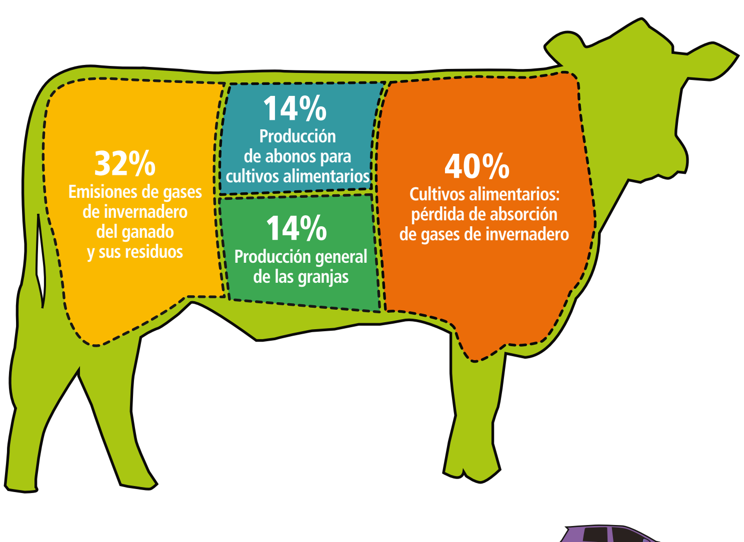
	Consumo de carne de vacuno en EE.UU. (millones de toneladas)	Equivalente de CO_2 de gases de efecto invernadero por la producción de carne de vacuno en EE.UU. (millones de toneladas)	Consumo mundial de carne de vacuno (millones de toneladas)	Equivalente de CO_2 de gases de efecto invernadero por la producción mundial de carne de vacuno (millones de toneladas)
2009 (previsión)	14	210	72	1100
2020 (previsión)	15	230	80	1200
2030 (previsión)	17	250	87	1300
Acumulativo (2009–2030)	340	5000	1800	26.000

Las cantidades se han redondeado a dos cifras significativas

La producción mundial de carne de vacuno está aumentando a un ritmo de casi el uno por ciento anual. Ello se debe al crecimiento de la población y también a la mayor demanda per cápita. El análisis económico muestra que, si se produjera toda la carne de vacuno en explotaciones intensivas (sistemas de explotación ganadera económicamente eficientes y que generan menos emisiones de gases de invernadero que muchos otros sistemas de cría), la producción de carne de vacuno para 2030 liberaría todavía 1300 millones de toneladas de equivalentes de CO_2 de gases de invernadero. Si las proyecciones actuales de consumo de carne de vaca son correctas, incluso bajo el sistema de producción intensivo el equivalente de CO_2 de gases de efecto invernadero aumentaría en 26.000 millones de toneladas en los próximos 21 años.
Fuentes: FAO ONU; censos oficiales

Cortes de primera: así genera gases de invernadero la producción de carne de vacuno

El mayor porcentaje del efecto invernadero por la producción de carne de vacuno proviene del CO_2 que ya no absorben los desaparecidos árboles, pastos y otras plantas anuales que cubrían el suelo que se dedica ahora a los cultivos alimentarios. El segundo porcentaje más elevado se debe al metano que emiten los residuos de animales y los propios animales cuando digieren la comida. Este análisis del sistema de granjas intensivas de vacuno en EE.UU. lo realizó Susan Subak, entonces en la Universidad de East Anglia.



PLAYBOY ARCHIVE/CORBIS (*mapa de carne*)

Bibliografía complementaria

GLOBAL ENVIRONMENTAL COSTS OF BEEF PRODUCTION. Susan Subak en *Ecological Economics*, vol. 30, n.º 1, págs. 79-91; 1999.

LIVESTOCK'S LONG SHADOW: ENVIRONMENTAL ISSUES AND OPTIONS. H. Steinfeld, P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales y C. de Haan. Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación; 2006.

MEETING THE DEMAND: AN ESTIMATION OF POTENTIAL FUTURE GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM MEAT PRODUCTION. Nathan Fiala en *Ecological Economics*, vol. 67, n.º 3, págs. 412-419; 2008.

Megaterremoto en el Valle de Cachemira

Las magnitudes que se atribuyen a seísmos del pasado presagian grandes sacudidas en este idílico valle

Susan Hough, Roger Bilham e Ismail Bhat

CONCEPTOS BASICOS

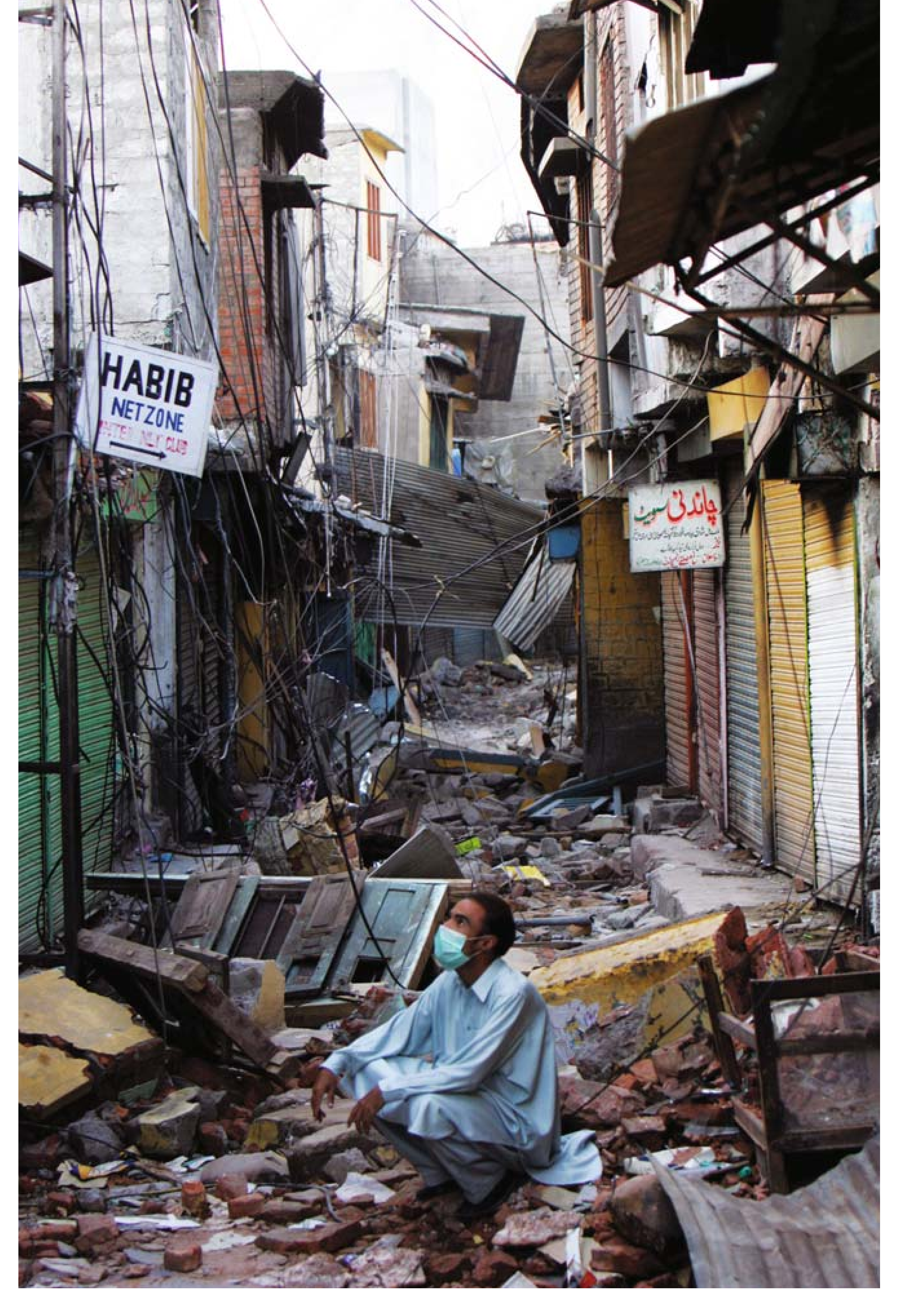
- Crónicas del siglo XVI describen las consecuencias de un terremoto, con sus réplicas, que afectó al Valle de Cachemira en 1555. Hablan de un pueblo que quedó enterrado por un corrimiento de tierras y de dos poblaciones que cambiaron de orilla en un río (debió de tratarse de una falla, no de una genuina traslación).
- El Templo del Sol de Martanda, en cambio, aguantó la embestida gracias a estar construido con sillares sobre roca más firme, a unos metros de altura sobre el valle.
- Aquel terremoto no llegó a la magnitud 8. Es de temer que se desencadene un megaterremoto que sobrepase esa intensidad para aliviar las tensiones que el empuje del subcontinente indio contra la placa euroasiática ha venido acumulando.

Rodeado de montañas por todas partes, el Valle de Cachemira, en India, ha sido, durante milenios, bendecido y maldecido a la vez por su geografía y su geología. Las cordilleras del Himalaya y el Pir Pinjal han proporcionado a los cachemires una fuente inagotable de agua para el riego de sus fértiles suelos. Los invasores potenciales han tenido que vérselas con una geografía que les oponía unas líneas de defensa casi inexpugnables. Sin embargo, las enormes fuerzas que alzan a estas montañas suponen un auténtico y presente peligro para el idílico valle. Como el subcontinente indio sigue empujando hacia el norte, la tensión no deja de acumularse en enormes fallas a lo largo del arco del Himalaya. Esa tensión se liberó en un segmento no muy grande de falla en otoño de 2005. Murieron más de 80.000 personas cuando el seísmo de Muzaffarabad, de una magnitud de 7,6, sacudió la Cachemira pakistaní y redujo casas, e incluso laderas enteras, a escombros.

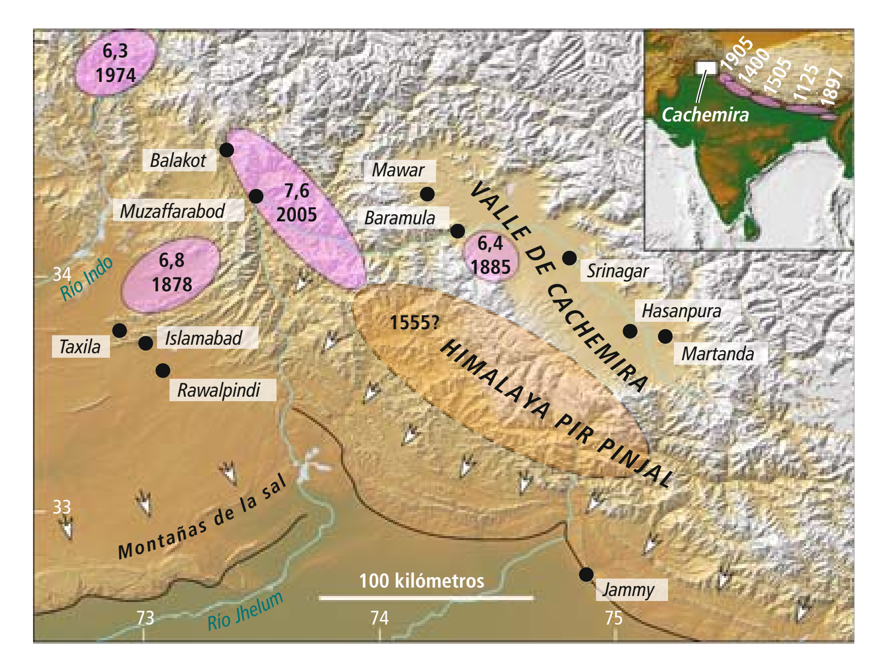
El propio Valle de Cachemira ha sido castigado por numerosos terremotos, moderados y violentos, a lo largo de su historia. La arquitectura tradicional de la región presenta dos estilos básicos de construcción: el *taq*, que emplea muros de albañilería y maderos horizontales insertos en las paredes de cada planta para unirlas al suelo; y el *dhajji-dewari*, que utiliza un entramado de madera relleno de albañilería (*véase la figura 3*). El uso de elementos estructurales de madera proporciona un sorprendente grado de resistencia a las sacudidas sísmicas. A finales del siglo XVI, Abdul Fazl, filósofo e historiador de la corte de Akbar, escribió: “Por la abundancia de madera y los terremotos constantes, no se construyen casas de piedra o de ladrillo”.

La arquitectura tradicional del Cachemira se adapta bien a un país de terremotos, aunque a medida que la población del valle ha ido creciendo, hasta llegar a los 5 millones, los elegantes edificios tradicionales han dejado paso a una destartalada mezcolanza de estructuras pobremente construidas, la mayoría de las cuales oponen poca resistencia a los movimientos sísmicos. La historia y la geología nos dicen que el arco del Himalaya sufrirá seísmos mucho mayores que en 2005, mayores que los

1. UN SUPERVIVIENTE QUE SE HA QUEDADO SIN CASA, de cuclillas, ante edificios derrumbados de Muzaffarabad, en el Cachemira pakistaní, al amanecer tras el terremoto del 15 de octubre de 2005, que mató a más de 80.000 personas. Seísmos de pareja intensidad menudean a lo largo del arco del Himalaya; liberan la tensión acumulada de la colisión de las placas tectónicas india y euroasiática. Los autores han examinado los testimonios históricos y geológicos. Han llegado a la conclusión de que en Cachemira no ha habido un temblor de magnitud 8 o mayor desde mediados del siglo XVI; por ello es muy probable, necesario incluso, que un megaterremoto libere esas tensiones.



PAULA BRONSTEIN/*Getty Images/American Scientist*



2. EL VALLE DE CACHEMIRA ESTA FLANQUEADO POR LA CORDILLERA PIR PINJAL DEL HIMALAYA al sur y por el Himalaya al norte. Esta región, en la unión de las placas india y euroasiática, se ve a menudo afectada por terremotos. Los situados con precisión aparecen en rosa. Otros muchos se mencionan en las viejas crónicas, en general insuficientemente detalladas para que hoy podamos calcular su localización y magnitud. La elipse de línea discontinua señala la posible localización del terremoto de 1555. En el mapa guía del recuadro aparecen los lugares donde se desencadenaron potentes terremotos a lo largo del arco del Himalaya; se nos revela que la región del Pir Pinjal del Himalaya podría sufrir un evento similar.

dañinos, aunque moderados, terremotos que han sacudido el Valle de Cachemira en siglos recientes. Dada la gigantesca escala de las fallas y las enormes fuerzas en esta parte del mundo, los terremotos en el rango de magnitud de 8,5, e incluso superior, sacudirán de nuevo, inevitablemente, la región.

En los últimos años, la geología ha hallado a lo largo del arco que forman Bután y Pakistán las cicatrices que tres monstruosos seísmos dejaron en los años 1125, 1400 y 1505, aproximadamente (*véase la figura 4*). Las dos primeras fechas son estimaciones con una precisión de 50 años arriba, 50 años abajo. El evento de 1505 está documentado históricamente: destruyó los monasterios budistas a lo largo de un segmento del Himalaya Central de 600 kilómetros de largo. Investigaciones de campo recientes revelan que en cada uno de esos megaterremotos las montañas frontales del Himalaya avanzaron en pocos segundos 20 metros sobre las llanuras de India.

Aún mayor

Cuando se produce un terremoto, un movimiento relativo repentino se da en el lado opuesto de la falla, horizontal o verticalmente. En el gran terremoto de San Francisco de 1906, la falla de San Andrés se movió horizontalmente una media de 4 metros a lo largo de una distancia de 450 kilómetros, ocasionando un seísmo de una magnitud estimada de 7,9. Con un deslizamiento de 20 metros, los mayo-

CORTESIA DE J. B. MACELWANE ARCHIVES, UNIVERSIDAD DE SAN LUIS (*sismógrafo*)/*American Scientist*

¿QUE SIGNIFICA LA MAGNITUD?

Puede que se hayan dado cuenta de que el nombre del padre del concepto de magnitud de un terremoto, Charles F. Richter, ha poco menos que desaparecido cuando se habla de terremotos. ¿Se ha abandonado la llamada escala de Richter? En realidad no. Sería más correcto decir que se han adaptado los cálculos matemáticos de Richter a diferentes circunstancias.

La escala original de magnitud de Richter es una descripción logarítmica de la amplitud de los movimientos del indicador de cierto tipo de sismógrafo (los sismógrafos de Wood-Anderson), normalizada a una distancia común. Richter diseñó la escala para medir los terremotos del sur de California con sismógrafos del sur de California.

Las magnitudes de Richter reflejan las vibraciones de alta frecuencia del movimiento de la tierra. Los sismómetros del sur de California todavía registran las vibraciones de los terremotos locales. Aunque en la actualidad resulta poco probable que se den magnitudes derivadas estrictamente a la manera de Richter, sí es posible encontrarse con magnitudes de las llamadas locales que, en esencia, equivalen a la magnitud clásica de Richter.



La magnitud de los terremotos del sur de California se registró durante muchos años por medio de la escala de Richter, un cálculo logarítmico del movimiento del brazo indicador de un sismógrafo de Wood-Anderson, como el que se muestra aquí.

Las cosas se complican cuando se trata de grandes terremotos. El sismógrafo de Wood-Anderson no capta bien la energía de onda larga que liberan los grandes terremotos. Por encima de una magnitud aproximada de 5,5, el nivel de las sacudidas de alta frecuencia no refleja de manera precisa la dimensión total, o liberación de energía, de un terremoto. Las modificaciones de la escala de magnitud se han centrado en todo el espectro de energías liberado por un terremoto, incluidas las ondas superficiales, las que se propagan cerca de la superficie terrestre. El patrón que se acepta en la actualidad de forma general es la escala de la magnitud de momento, que refleja la dimensión total de un terremoto: el tamaño de la falla que se mueve y la dimensión del deslizamiento.

Los sismólogos suelen hablar ahora de magnitud sin especificar a qué tipo se refieren. Si el terremoto es de grandes dimensiones, es casi seguro que se trata de la magnitud de momento. Se pretende que esta escala, igual que los demás refinamientos posteriores, se solape fácilmente con la formulación original de Richter. Es decir, las unidades con que se mide la magnitud son arbitrarias: no incluyen unidades físicas. Así, el significado de la magnitud —tres en un seísmo pequeño, seis en uno moderado— coincide con el definido por Richter en 1935.




3. LA CONSTRUCCION TRADICIONAL de Cachemira combina elementos de madera y albañilería. Esta manera de edificar, llamada *dhajji-dewari*, no sólo aprovecha los materiales locales, sino que además resiste bien los terremotos. Estos edificios de Srinagar, en Cachemira, se mantienen en pie mediante postes y vigas de madera y relleno de albañilería. Resulta interesante fijarse en las escuadras metálicas de la esquina del edificio de la foto de la derecha. Desafortunadamente, a medida que en los últimos años la población del Cachemira ha aumentado hasta alcanzar los 5 millones de habitantes, las nuevas construcciones han ido abandonado las técnicas probadas a lo largo del tiempo en favor de una destartalada confusión de edificios de ladrillo que no aguantan los temblores del suelo.

ROGER BILHAM/*American Scientist*

res megaterremotos del Himalaya pertenecen a una categoría superior a la del mítico *Big One* que temen los californianos (*véase el recuadro* "¿Qué significa la magnitud?"). Los cálculos más recientes, además, sugieren que no sólo son posibles megaterremotos, con magnitudes muy por encima de 8,0 en el arco del Himalaya, sino que son necesarios para liberar la tensión generada por el movimiento continuo en sentido norte de India hacia Eurasia.

Las investigaciones paleosismológicas a lo largo del arco del Himalaya permanecen en sus inicios; en un futuro nos dirán mucho más sobre los seísmos históricos e incluso prehistóricos. Mientras tanto, los registros históricos pueden proporcionarnos información valiosa sobre lo ocurrido en los siglos más recientes. Concretamente, los documentos hallados en los archivos proporcionan descripciones directas de la severidad de los temblores asociados a episodios del pasado. Como sismólogos, pretendemos siempre estimar las magnitudes, localizaciones y los parámetros de ruptura; sin embargo, la clave para la previsión de riesgos y su atenuación estriba en evaluar la fuerza con que temblará la tierra en terremotos futuros.

Por lo que se refiere al Valle de Cachemira, existe historia escrita desde hace casi 5000 años; sin embargo, las fuentes históricas que han llegado hasta nosotros revelan muy poco de los terremotos anteriores al siglo XVI; más aún, muchas crónicas son meras repeticiones de fragmentos previos, embellecidos o "corregidos" por diversos historiadores posteriores. Los registros que han sobrevivido contienen un revoltijo de nombres de lugares afectados que han sido rebautizados una docena de veces y cuyos nombres se han escrito erróneamente o se han transcrito a otras grafías en repetidas ocasiones.

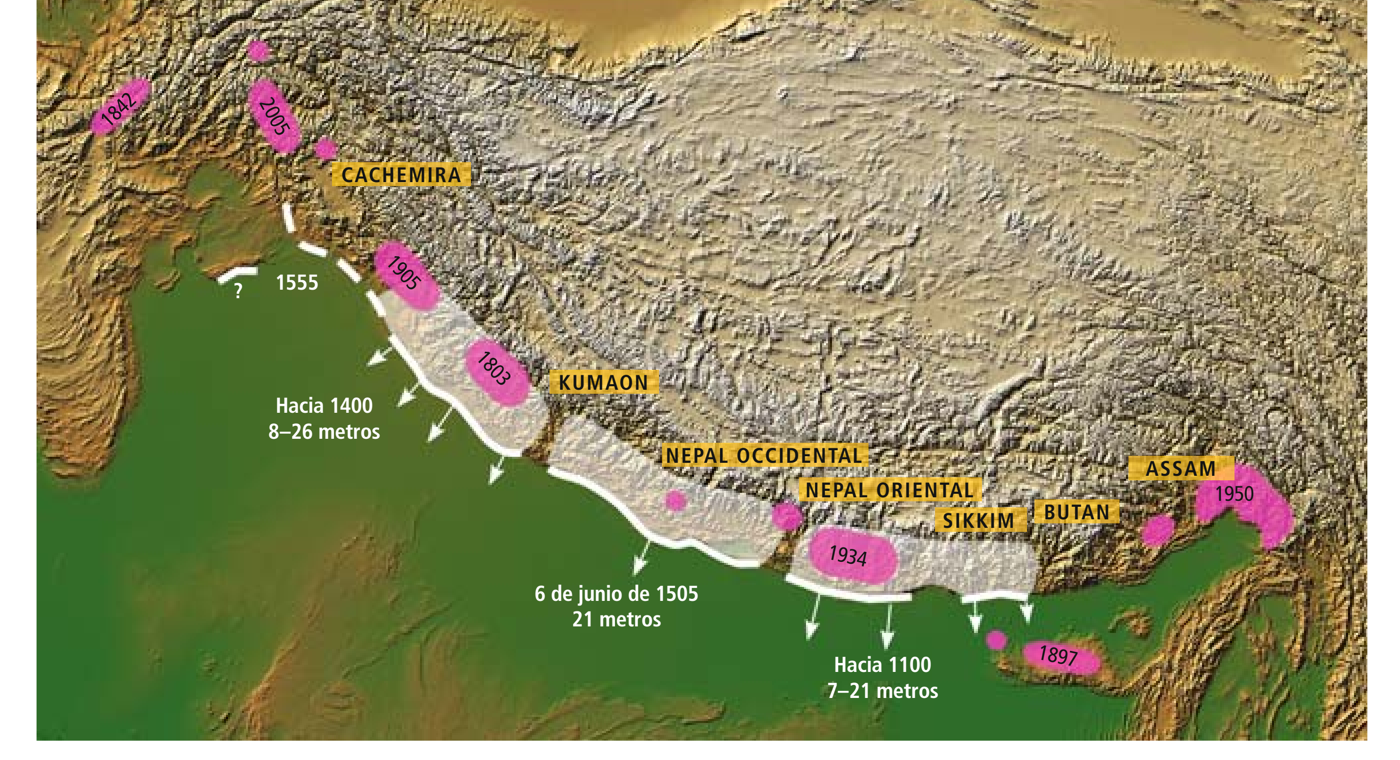
Recientemente, los sismólogos han comprendido que, para vislumbrar el futuro de los terremotos en Cachemira, los registros en cuestión son una buena guía, a pesar de lo confusos que resultan. Esto ha llevado a algunos a investigar vieja documentación conservada en India y Europa. Hoy en día, a los historiadores (y los sismólogos) les resulta mucho más fácil rastrear los textos sánscritos, tibetanos, árabes, mongoles y musulmanes, muchos de ellos desconocidos para los eruditos occidentales hasta hace dos o tres siglos: los motores informáticos de busca les ayudan.

En la pasada década, dos ingenieros especialistas en construcción antisísmica orientaron la atención hacia la interpretación de lo escrito por los cronistas sobre los terremotos de Cachemira: R. N. Iyengar, del Instituto de Investigación Central Building, de India, y N. N. Ambraseys, del Colegio Imperial de Londres. Entre los historiadores, desempeñaron un papel similar Shri Devendra Sharma, del Instituto de Investigación Central Building, y David Jackson, de la Universidad de Hamburgo. Vistos con esos ojos informados sismológicamente, los textos originales resultan a menudo más explícitos que las obras de los historiadores que ahora están a nuestra disposición.

Pese a todo, los textos todavía resultan a veces ambiguos. En 1690, el persa Pir Hasan Shah describió un desprendimiento de tierras que cegó el río cercano a Jhelum en 883. En otro documento, escrito en sánscrito hacia el año 1400, encontramos que esta presa natural y su catastrófico embalse fueron hábilmente

"Por la abundancia de madera y los terremotos constantes, no se construyen casas de piedra o de ladrillo."

—Abul Fazl, filósofo e historiador de la corte de Akbar del siglo XVI



4. EL HIMALAYA FORMA UN ARCO que separa la meseta del Tibet de la placa india. Esta avanza hacia el norte a un ritmo de más de 15 milímetros al año. Las áreas rosadas son las zonas de ruptura de los terremotos catastróficos (de magnitudes entre 7,3 y 8,6) de los dos últimos siglos; las grises delimitan las enormes zonas de ruptura que se han inferido para los megaterremotos medievales. Tan sólo de uno de ellos, el de 1505, hay constancia en las crónicas. Las flechas indican los puntos donde se produjeron fallas. Steve Wesnousky, de la Universidad de Nevada en Reno, Jerome Lave, del Centro de Investigación Petrográfica y Geoquímica de Nancy, y Doug Yule, de la Universidad de California en Northridge, han hallado los deslizamientos de estos terremotos. La zona de ruptura de 1555 es hipotética.

Los autores

Susan Hough es sismóloga del Centro de Terremotos del Sur de California. **Roger Bilham**, profesor de ciencias geológicas, dirige el programa de doctorado de geofísica de la Universidad de Colorado en Boulder, de cuyo Instituto de Cooperación para la Investigación en Ciencias Medioambientales es miembro. **Ismail Bath** enseña en el departamento de geología y geofísica de la Universidad de Cachemira, en Srinagar, India. Es especialista en petrología y tectónica.

© *American Scientist Magazine.*

eliminados por un ingeniero cachemir llamado Suyya, que dio nombre a la actual ciudad de Sopor (Suyyapura). El desprendimiento de tierras, ¿fue desencadenado por un terremoto o por lluvias torrenciales? A menudo los terremotos taponan los ríos, como ocurrió en 2005, cuando los ríos del oeste de Cachemira quedaron represados durante varios minutos, y en algunos casos durante meses, por rocas, árboles y tierra procedentes de las empinadas laderas. Sin embargo, aunque supiésemos la causa de la catástrofe del año 883, a partir de un solo documento no podremos determinar si se trató de un pequeño terremoto de alcance local o de otro imponente. Sin embargo, los últimos constituyen los desastres cuya magnitud pasada y probabilidad futura más importantes son para la sociedad cachemir.

La magnitud de un terremoto histórico se puede inferir de su notoriedad en la región y la destrucción que causó en ella. Otro indicio es una serie de grandes réplicas, sintomáticas del ajuste de la tensión que sigue a un terremoto enérgico. Los daños que uno de estos terremotos produjo en una vasta zona de Cachemira quedaron documentados en 1555, o quizás en 1554 (la fecha del terremoto principal que aparece en los textos es el año 962 tras la Hégira del calendario lunar musulmán, el período comprendido entre el 26 de noviembre de 1554 y el 15 de noviembre de 1555).

La primera descripción de este terremoto, y cabe presumir que la más fiable, es la de Shuka, continuador a finales del siglo XVI de la larga tradición del *Rajatarangini* —el "río de los reyes"—, serie de crónicas reales que él prolongó hasta la conquista de la región por Akbar en 1586. Shuka nos cuenta que el terremoto ocurrió en septiembre de 1555, en la segunda vigilia (entre 4 y 8 horas después del anochecer).

Las menciones de este evento más antiguas hablan de frecuentes sacudidas en Cachemira durante el mes que precedió al terremoto principal; varios textos mencionan réplicas. El terremoto principal de 1555 parece haber formado parte de una secuencia clásica precursor-sismo principal-réplica que se alarga durante años. Los efectos documentados, así como las menciones de fuertes réplicas que se sucedieron durante al menos varias semanas, apuntan a un episodio superficial de gran magnitud. Ambraseys y Jackson calcularon una magnitud de superficie de 7,6, aunque la estimación es, claro está, muy imprecisa: pudo ser aún mayor, entre 7,8 y 8.

Las descripciones históricas rememoran efectos muy considerables, aunque poco claros. Se perdieron bastantes vidas, según parece por el derrumbamiento de los edificios, los hundimientos de terrenos y varios desprendimientos de tierra. Briggs tradujo el párrafo siguiente en 1910:

El año 962 (1554/1555) fue de notar por un severo terremoto en Cachemira; en esta ocasión, la ciudad de Dampoor, con varios huertos y vergeles, se movió de la orilla oriental del río Behut a la occidental; y un pueblo, Jadra, bajo las montañas, fue destruido por el

American Scientist

derrumbe de gran parte de la montaña sobre el pueblo; allí perecieron más de seis mil.

La mayoría de las crónicas posteriores citan también la destrucción de una población por un imponente desprendimiento de tierras. El nombre del lugar varía en distintas traducciones: Jadra, Mardar, Mawar, Maru Pergam. Aunque los nombres difieren, la similitud de las crónicas da a entender que se trata del mismo sitio. La localización de Maru Pergam o Mawar es incierta. Una de las dificultades a la hora de interpretar las antiguas crónicas históricas en esta parte del mundo concierne a la traducción, muy variable, de la toponimia. Hoy hay un Mawar al noroeste de Baramula, a los pies de la cordillera del Pir Pinjal, en el oeste de Cachemira. Otros han conjeturado que el pueblo destruido estaba 140 kilómetros al sureste de Srinagar.

El número de fallecidos por el desprendimiento de tierras se cifra en unos 600, aunque algunos cronistas añadiesen uno o dos ceros al guarismo. Así, un autor del siglo XVI dice que a Mardar la sepultó un desprendimiento que mató a 60.000 personas, probablemente un número muy superior a su población de antes del seísmo. Ferishta, viajero persa de finales del siglo XVI, habla de 600 muertos, cifra a la que se suele considerar más creíble que las más altas.

Ambraseys y Jackson identifican seis lugares del Valle del Cachemira afectados por el terremoto. El más occidental es Baramula, a 50 kilómetros al oeste-noroeste de Siringar. El más oriental que se puede ubicar con cierta seguridad es el santuario de Martanda (del que hablaremos más adelante), unos 5 kilómetros al este de Anantnag. Aunque las crónicas se explayan con las consecuencias del terremoto, no se puede determinar con claridad su intensidad en ninguna de las localizaciones. Por ejemplo, aunque las crónicas históricas nos expliquen que "una gran parte de la montaña se desprendió", se sabe que los corrimientos de tierras no son indicadores fiables de la intensidad de las sacudidas.

El terremoto de 1555 es famoso sobre todo por el curioso cambio de orilla, según cuentan varios historiadores, de dos poblaciones situadas a lo largo del río Jhelum. Los cronistas son bastante explícitos acerca de esa traslación. Nizamuddin Ahmad, de la corte de Akbar, escribía hacia 1585: "Dos pueblos, Jalu y Dampur, con sus edificios y árboles, pasaron de una orilla del Jhelum a la opuesta". Historiadores posteriores repitieron estas crónicas, a veces adornándose. Los orígenes de tan famosa y misteriosa creencia parecen encontrarse en una crónica de Shuka, que se limitaba a afirmar lo siguiente: "Todavía se ve hoy la devastación creada por el terremoto en dos pueblos, Hasainapura y Hosainapura, a cierta distancia uno del otro a lo largo del río".

> *"Todavía se ve hoy la devastación creada por el terremoto en dos pueblos, Hasainapura y Hosainapura, a cierta distancia uno del otro a lo largo del río."*
>
> —Shuka



SUSAN HOUGH/*American Scientist*

5. LOS TOCONES INCLINADOS DE ARBOLES a lo largo de un afluente del río Jhelum cerca de Hussainpur y Hossainpur, dos poblaciones de Cachemira, muestran el desplome del terreno. Que las crónicas del siglo XVI cuenten que estos dos pueblos saltaron de un lado del río al otro se explica más por una falla del terreno a lo largo del río que por un trastoque general causado por el movimiento sísmico en sí.

Shuka no se refiere, pues, a ningún traslado mágico de las dos poblaciones, sino a la destrucción, en buena medida, de ambas, seguramente más como consecuencia de alguna falla a lo largo de la orilla del río que por la sacudida misma. Una vez más, sin embargo, no se puede determinar la intensidad del temblor a partir de la descripción de un hundimiento del suelo.

Podría ir pareciendo que no hay esperanza alguna de desentrañar los efectos del terremoto de 1555. Como mínimo, no hay esperanza de poder cartografiar los efectos con el detalle que ha permitido a los sismólogos investigar terremotos históricos posteriores con mucha precisión. Con todo, las localizaciones que se infieren de lo dicho en las crónicas nos proporcionan información suficiente para extraer algunas conclusiones sobre el alcance de aquel evento. Y un viaje en el que estudiamos el Valle de Cachemira nos ayudó a descifrar las confusas crónicas. A lo largo del río donde se encuentran las actuales poblaciones de

> *“Gracias a la gloria de los sagrados santuarios de Vijayeshvara Martanda y Varahakshetra, no llegaron quienes viven en esos lugares a sentir miedos y aprensiones por los terremotos.”*
>
> —Shuka





6. EL TEMPLO DEL SOL DE MARTANDA se ha librado no sólo de los estragos de Sicunder el Iconoclasta, que arrasó muchos templos cachemires, sino de que numerosos terremotos lo destruyesen. Los autores atribuyen su supervivencia a dos características fundamentales. En primer lugar, el templo se construyó a una altura de 90 metros sobre el suelo del valle, sobre roca muy resistente, no sujeta al movimiento de amplificación que sufren los sedimentos no consolidados. En segundo lugar, está construido con sillares tallados de modo que encajen perfectamente unos en otros.

American Scientist

Hussainpur y Hossainpur las cicatrices de las márgenes revelan su tendencia a desplomarse incluso sin terremotos (*véase la figura 6*).

En suelo firme

Visitamos con unos colegas de la Universidad de Cachemira el famoso Templo del Sol de Martanda (*véase la figura 6*), objeto de otra curiosa leyenda. Según Shuka, “gracias a la gloria de los sagrados santuarios de Vijayeshvara Martanda y Varahakshetra, no llegaron quienes viven en esos lugares a sentir miedos y aprensiones por los terremotos”. Historiadores posteriores afirman que las gentes del Valle creían que el Templo de Martanda se salvó por la protección divina. Shuka da a entender que los terremotos se notaron en la región de Anantnag y en la actual Baramula (Varahakshetra), pero los efectos fueron menores que en otros lugares.

El templo de Martanda, que se libró de la suerte de la mayoría de los templos más antiguos de Cachemira —los arrasó a principios del siglo XV Sicunder el Iconoclasta—, no ha esquivado, sin embargo, los estragos causados por el hombre y la naturaleza. Sus delicados arcos y torres demuestran que escapó de la destrucción total en el terremoto de 1555, aunque lo dañasen conflictos posteriores. El templo se sitúa a más de 1500 metros de altitud, pero a tan sólo 90 metros sobre el valle vecino. Las aldeas cercanas se elevan unos 60 metros con respecto al valle. Para el ojo entrenado de un sismólogo moderno, se impone una interpretación: que allí el temblor fue menos severo y sus habitantes temieron menos: el templo y los pueblos de los alrededores estaban construidos sobre rocas resistentes que no experimentaron la gran amplificación sísmica que casi con toda seguridad se produjo en el valle. El templo se salvó también gracias a su construcción, sobre poderosos sillares, esculpidos por todas las caras y tallados uno a uno para que encajen entre sí.

Al final de nuestra expedición, todavía nos quedamos con más preguntas que respuestas. Aún no nos ha quedado claro, por ejemplo, si el gran desprendimiento de tierras que enterró Mawar ocurrió en un extremo del Valle de Cachemira o en un pueblo parecido, Maru Petgam, del otro extremo. Sin embargo, todos los indicios apuntaban a que un terremoto de una magnitud de entre 7,6 y 7,8 causó una destrucción importante en todo el valle. A pesar de que no se puede descartar una magnitud mayor, parece que no se trató de un megaterremoto del Himalaya.

De la severidad del episodio da fe la crónica de Shuka: “[...] mató a muchos. Abrió

agujeros en la tierra, los viajeros se perdían a cada paso. Las casas caían a los agujeros durante la noche”. Shuka escribió también que “en el mes de Ashvina (septiembre) del año 30 de su reinado (1555) abundaron los terremotos a causa de los perversos actos del rey, como si la tierra sufriera de flatulencia”. A continuación distingue el terremoto principal, de lejos el peor, de los otros que se dieron a lo largo del mes.

No si habrá un gran terreno, sino cuándo

A partir de medidas tomadas con GPS sabemos que ninguna parte del Himalaya queda libre del avance de la placa india hacia el norte bajo las montañas; los terremotos son inevitables a lo largo de toda la cordillera. Más aún, el terremoto de 1554/55 pudo haber sido el más reciente de los grandes e irregulares terremotos de Cachemira. Más por deducción que por pura evidencia, sospechamos que el evento de 1554/55 se centró en la base de la cordillera del Pir Panjal (una triple redundancia, ya que *Pir*, *Panjal* y *cordillera* significan “montaña”). Esta zona se halla en el extremo más occidental del Himalaya, una región que no ha sufrido ningún terremoto importante desde 1555. Tiene una extensión de casi 400 kilómetros por 80, suficiente para albergar un terremoto de magnitud 8.

Los datos del GPS nos muestran que, en la actualidad, la convergencia de la región es de más de 15 milímetros al año. Si la convergencia ha procedido a ese ritmo desde 1555, hoy se tendrá ya un movimiento potencial de 6,8 metros, suficiente para originar otro terremoto de magnitud similar a la de aquél.

La turbadora conclusión es que una repetición de lo que ocurrió en 1555 podría estar cerca. No se puede descartar un futuro megaterremoto que sobrepase los confines de Cachemira. Cerca, ¿hasta qué punto? Por desgracia, lo que ignoramos supera con creces lo que sabemos; los mecanismos que generan terremotos no funcionan como un reloj. Sí sabemos que las tensiones generadas por el terremoto del Cachemira de 2005, de una magnitud hasta cierto punto modesta, 7,6, no disipó todas las acumuladas en la vecindad de la zona de ruptura de 1555; es más: las reforzó. Como enseñan otras grandes fallas del mundo, parece claro que los segmentos de falla adyacentes a veces se rompen secuencialmente, en una especie de efecto dominó, con los terremotos principales separados por días, meses, años y a veces decenios. Si el segmento de Cachemira es la próxima pieza de dominó en caer del arco del Himalaya, el futuro terremoto será allí devastador.

Bibliografía complementaria

A NOTE ON EARLY EARTHQUAKES IN NORTHERN INDIA AND SOUTHERN TIBET. N. Ambraseys y D. Jackson en *Current Science*, vol. 84, págs. 570-582; 2003.

AFTER THE EARTH QUAKES. S. E. Hough y R. Bilham. Oxford University Press; Nueva York, 2005.

GREAT HIMALAYAN EARTHQUAKES AND THE TIBETAN PLATEAU. N. Feldl y R. Bilham en *Nature*, vol. 444, págs. 165-170; 2006.

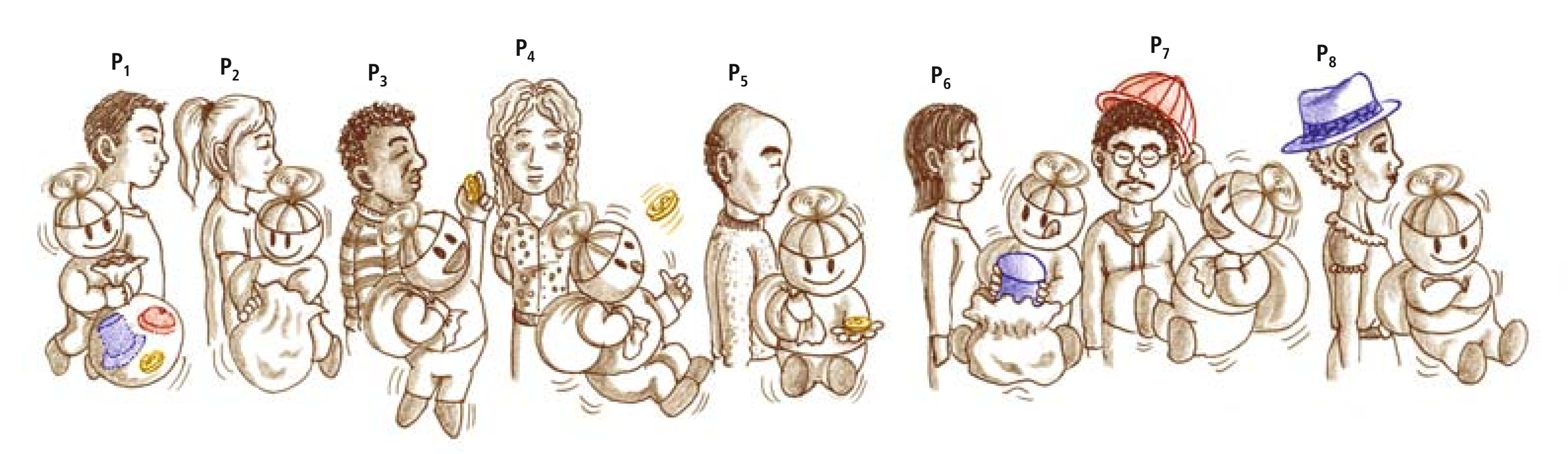
EARTHQUAKE HAZARD IN KARACHI, PAKISTAN: UNCERTAIN PAST, UNCERTAIN FUTURE. R. Bilham, S. Lodi, S. E. Hough, S. Bukhary, A. M. Khan y S. F. A. Rafeeqi en *Seismological Research Letters*, vol. 78, págs. 601-613; 2007.

RICHTER’S SCALE: MEASURE OF AN EARTHQUAKE, MEASURE OF A MAN. S. E. Hough. Princeton University Press; Princeton, 2007.

Sombreros e infinitos

Cómo garantizar resultados en una situación aleatoria

Agustín Rayo



En la columna del mes de febrero presenté el problema siguiente. (No sé quién es su descubridor original; a mí me lo contó mi alumno Dan Greco.)

Infinitas personas (P_1, P_2, P_3,...) forman una fila: P_1 está detrás de P_2, P_3, P_4,...; P_2 está detrás de P_3, P_4, P_5,...; y así sucesivamente (*véanse las ilustraciones*). Cada uno de ellos tiene puesto o bien un sombrero rojo o bien un sombrero azul. Se utilizó un proceso aleatorio para determinar qué sombrero ponerle a cada persona. Nadie conoce el color de su propio sombrero, pero cada individuo puede ver los colores de los sombreros de las personas que tiene delante. A una hora predeterminada, cada persona tiene que gritar, o bien "¡rojo!", o bien "¡azul!". (Los gritos tienen que ser simultáneos, de manera que nadie pueda utilizar lo que dicen los demás para decidir con qué color comprometerse.) A los que identifiquen correctamente el color de su sombrero se les perdonará la vida; a los demás se les cortará la cabeza.

Problema: ¿Qué estrategia podrían acordar de antemano P_1, P_2, P_3,... para garantizar que muera a lo más un número finito de personas?

Por sorprendente que parezca, existe una solución. En la columna de este mes veremos cómo funciona, pero antes quisiera explicar por qué el resultado es tan sorprendente.

Sabemos que se utilizará un procedimiento aleatorio para determinar qué sombrero ponerle a cada persona. Imaginemos que el procedimiento es el siguiente. Cada persona tiene a su lado a un 'asistente'. La persona cierra los ojos mientras su asistente tira una moneda. Si la moneda cae de cara, el asistente le pone un sombrero rojo; si sale cruz, le pone un sombrero azul.

Supongamos, además, que se sabe que la probabilidad de que una moneda caiga de cara es exactamente 50 %, y que esto es así independientemente de cómo hayan caído las otras monedas. Entonces, el hecho de que una persona pueda ver de qué color son los sombreros de las personas que tiene delante *no le proporciona ninguna información* acerca del color de su propio sombrero. Mientras permanezca convencido de que el resultado de tirar una moneda dada es independiente del resultado de tirar las demás monedas, deberá asignarle una probabilidad del 50 % a la posibilidad de que su sombrero sea rojo, cualesquiera que sean los colores de los sombreros que tiene delante.

De esto parece seguirse que ninguna de las personas goza de una probabilidad de acertar superior al 50 %. ¿Cómo es posible, entonces, que puedan arreglárselas para garantizar que sólo una minoría pequeñísima —una parte finita de las infinitas personas que hay— adivine mal?

He aquí una estrategia. Cada asignación posible de sombreros a personas puede representarse como una secuencia infinita de ceros y unos. (Un cero en la *k*-ésima posición significa que el sombrero de P_k es azul y un uno significa que es rojo.) Sea S el conjunto de todas estas secuencias.

S puede dividirse en 'órbitas'. Diremos que dos secuencias en S están en la misma órbita, si y sólo si difieren únicamente en un número finito de posiciones. Por ejemplo, la secuencia <0,0,0,0,...> y la secuencia <1,0,0,0,...> se hallan en la misma órbita porque difieren sólo en la primera posición, pero la secuencia <0,0,0,0,...> y la secuencia <1,0,1,0,...> están en órbitas diferentes porque difieren en un número infinito de posiciones.

La estrategia consiste en que P_1, P_2, P_3, ... elijan de antemano un representante de cada órbita. (Los que sepan del tema reconocerán que aquí se presupone el Axioma de Elección.) Una vez que comience el ejercicio cada persona podrá ver los colores de las personas que tiene delante, y desconocerá sólo los colores de un número finito de sombreros. Esto significa que, aunque la persona no sea capaz de determinar cuál es la asignación de sombreros que de hecho ocurrió, dispondrá de suficiente información para determinar cuál es la *órbita* a la que pertenece la asignación de sombreros que de hecho ocurrió. Llamemos *o* a esta órbita.

Para completar la estrategia, basta que cada persona utilice el representante preseleccionado de *o* para decidir con qué color comprometerse: P_k gritará 'azul' si el representante de *o* tiene un cero en la *k*-ésima posición, y gritará 'rojo' si el re-

presentante de *o* tiene un uno en esa posición. Dado que el representante de *o* y la secuencia correspondiente a la asignación de sombreros que de hecho ocurrió se encuentran en la misma órbita, sabemos que difieren a lo más en un número finito de posiciones. Por consiguiente, siempre y cuando todos actúen de acuerdo con la estrategia, habrá sólo un número finito de personas que identifiquen incorrectamente el color de su sombrero. *Quod erat demonstrandum*.

(Esta estrategia presupone que P_1, P_2, P_3,... tienen capacidades sobrehumanas. Por ejemplo deben ser capaces de absorber cantidades infinitas de información en tiempos finitos y de seleccionar representantes de conjuntos sin orden natural. De esto se sigue que un ser de carne y hueso nunca podría ejecutar la estrategia; mas, para nuestros propósitos, basta con que la estrategia exista.)

En algún sentido hemos solucionado el problema: hemos identificado una estrategia que garantiza que no haya infinitas muertes. Pero hay otro sentido en el que la situación parece tan misteriosa como cuando comenzamos.

Antes habíamos visto que el hecho de que alguien conozca los colores de todos los sombreros que tiene delante no le proporciona ninguna información acerca del color de su propio sombrero. Uno pensaría, por tanto, que sin algún procedimiento que le permita adquirir información adicional acerca del color de su sombrero la probabilidad de que una persona acierte no puede ser mayor que el 50 %. Y en la solución que propuse, nadie parece adquirir información que tenga que ver con el color de su sombrero.

Es cierto que cuando las personas actúan de acuerdo con la estrategia de la solución, no están decidiéndose por un color al azar; están tomando sus decisiones metódicamente. Claramente hay métodos que mejorarían la probabilidad de acertar (por ejemplo, el método de mirarse en un espejo y tomar la decisión de acuerdo con lo que diga el espejo). El problema es que en el caso particular de la estrategia que propuse no está claro por qué habría uno de mejorar sus probabilidades. Nótese, por ejemplo, que —a diferencia del método del espejo— lo que nuestra estrategia le recomienda hacer a una persona dada no depende del color de su sombrero. La persona hubiera recibido la misma recomendación, aunque el color de su sombrero hubiera sido diferente (siempre y cuando los sombreros de las personas que tiene delante no cambien de color).

De hecho, es tentador pensar que P_k está en posición de razonar como sigue: "Estoy tomando mi decisión de acuerdo con la *k*-ésima posición del representante que escogimos de antemano para *o*. Pero no había ninguna razón para escoger ese representante en particular. Lo mismo hubiéramos podido escoger cualquier otro. Y hay precisamente tantas secuencias en *o* que tienen un cero en la *k*-ésima posición como secuencias que tienen un uno. Por tanto, la probabilidad de que el representante que escogimos prediga correctamente el color de mi sombrero es del 50 %."

Pero si resulta que la probabilidad de acertar utilizando la estrategia que propuse es del 50 %, ¿cómo es posible *garantizar* que no habrá infinitas muertes? ¿No dependeríamos de la suerte?

Afortunadamente, el razonamiento de P_k es falaz. Aunque es cierto que en *o* hay tantas secuencias con un cero en la *k*-ésima posición como secuencias con un uno en esa posición, esto no basta para concluir que la probabilidad de terminar con una secuencia del primer tipo es del 50 %, cuando uno elige al azar.

La probabilidad de terminar con una secuencia del primer tipo *no está definida*. Esto es porque cuando el número de opciones al que nos enfrentamos es infinito, las probabilidades dependen de la *geometría* de nuestro espacio de opciones. Y en el caso de *o* podrían utilizarse geometrías diferentes, y no tenemos ninguna razón para preferir una sobre las demás.

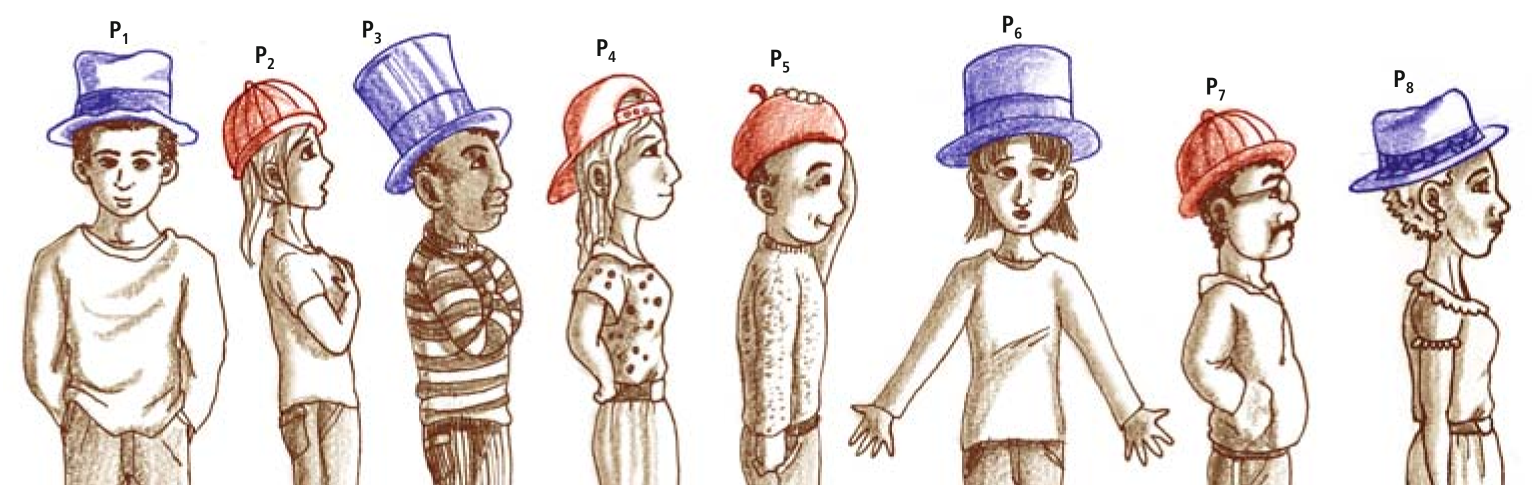
Como consecuencia de ello, tampoco está bien definida la probabilidad de que una persona identifique correctamente el color de su sombrero cuando utiliza la estrategia que propuse. No sería correcto decir, en otras palabras, que una persona *mejora* sus probabilidades de no morir cuando es parte de un grupo que utiliza la estrategia. Lo único que puede decirse es que sus probabilidades pasan de ser del 50 % a no estar bien definidas.

Tal vez algún miembro del grupo se sienta aliviado de pensar que de las infinitas personas que hay en el grupo sólo un número finito —una minoría pequeñísima— morirá. Pero esa reflexión no debería ser tan reconfortante como parece. Pues aunque morirá sólo un número finito de personas, no hay ningún límite al tamaño que puede tener este número. Es cierto que a partir de algún lugar en la fila habrá una secuencia ininterrumpida de supervivientes, pero desde la perspectiva de una persona dada, la gran mayoría de los puntos en los que podría comenzar esa secuencia —todos excepto un número finito— quedan demasiado adelante para ofrecer algún consuelo.

Hemos visto que no es cierto —contrariamente a lo que cabría pensar— que uno mejora sus probabilidades de sobrevivir cuando pertenece a un grupo que utiliza la estrategia. Esto elimina una parte del misterio que rodea al problema, pues muestra que no tenemos que preocuparnos de que haya alguna persona cuya probabilidad de acertar sea superior al 50 % aunque carezca de información adicional sobre el color de su sombrero.

He de confesar, sin embargo, que no me parece haber llegado al fondo del asunto. Continuaré pensando en el problema.

Agustín Rayo es profesor asociado de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.



Recibido y oído

El oído posee una sensibilidad extraordinaria. Este órgano detecta ínfimas oscilaciones del aire, cuyas amplitudes apenas alcanzan algunas decenas de micras. ¿Cómo lo consigue?

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Una millonésima de millonésima de watt es la potencia del sonido que detecta nuestro oído cuando oímos un murmullo. ¿Cómo percibe tan sutiles vibraciones del aire nuestro aparato auditivo? Capta la onda sonora y la transmite íntegra hasta las células ultrasensibles de la cóclea, en el oído interno. La clave reside tanto en la transmisión del sonido como en su detección.

Toda una escala

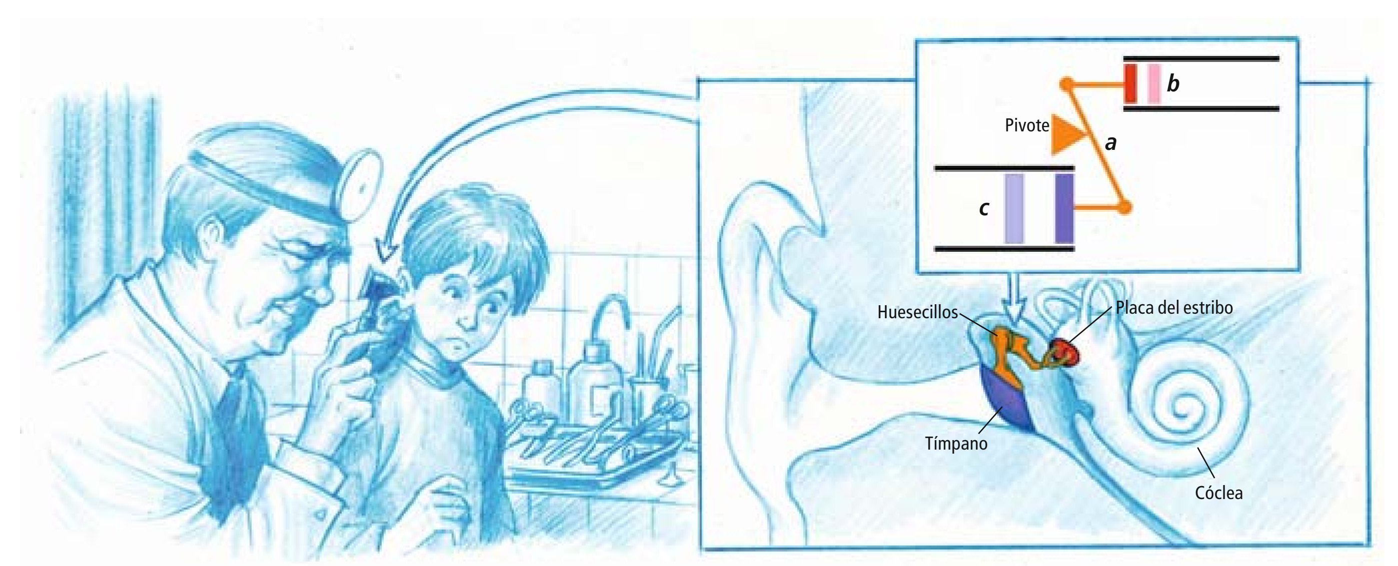
Lo que nosotros percibimos como sonidos son vibraciones del aire de una frecuencia comprendida entre 10.000 y 20.000 hertz, pero algunos animales como las ballenas y los murciélagos captan los (ultra)sonidos hasta los 150.000 hertz más o menos. Al paso de una onda sonora la presión del aire oscila arriba y abajo de la presión atmosférica; se llama a la diferencia "presión acústica". La amplitud de la presión acústica es de 10^{-5} pascal (o sea, 10^{-10} atmósferas) para un murmullo, de 10 pascal para el ruido de un martillo neumático. Así pues, el espectro audible se caracteriza por un factor de mil en las frecuencias y de un millón en las amplitudes.

Los fisiólogos han comprobado que, cuando comparamos dos estímulos, lo que discernimos no es su diferencia algebraica, sino su cociente. Por tanto, las escalas adecuadas para describir nuestras percepciones serán las basadas en los cocientes, es decir, las escalas logarítmicas. Así, los "intervalos" empleados por los músicos para dar cuenta de la diferencia entre dos notas —su altura relativa— representan cocientes de frecuencias, y se llama octava al intervalo correspondiente a una duplicación de la frecuencia. Los sonidos los percibimos según la misma ley: igual diferencia percibimos entre sonidos de potencias 1 y 10 que entre sonidos de potencias 10 y 100. Para la intensidad de los sonidos, es decir, la energía que transportan por unidad de superficie y de tiempo, la unidad apropiada es el bel o belio: una diferencia de un belio, o de diez decibelios (10 dB), corresponde a un cociente de intensidades igual a 10. Como la intensidad transmitida es proporcional al cuadrado de la presión sonora, una variación de esa presión por un factor de 10 corresponde a una variación de la intensidad por un factor de 100, o sea, 2 belios o 20 decibelios.

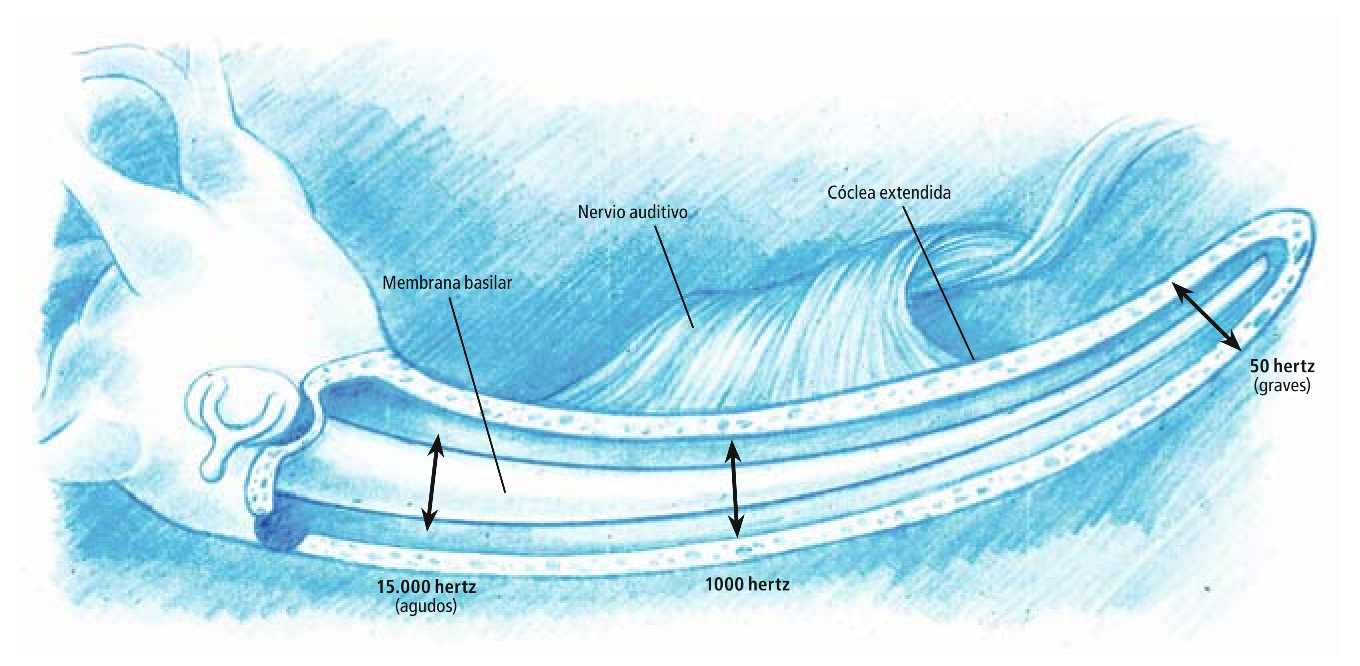
El cero de la escala corresponde a nuestro umbral de percepción. Por convenio, está fijado en una presión acústica de amplitud 2×10^{-5} pascal. El habla corresponde a frecuencias próximas al "la" del diapasón, a 440 hertz (el tono del teléfono), y a intensidades en torno a los 60 decibelios. Estas características sitúan la voz humana en el centro de nuestra ventana de percepción (expresada en escala logarítmica). Durante una conversación normal, la intensidad sonora que nos llega es del orden de una millonésima de watt por metro cuadrado, y corresponde a desplazamientos de las capas de aire de apenas 20 nanómetros (20 milmillonésimas de metro). ¡No se adivina fácil la tarea del oído!

Cómo se transmite el sonido

En una primera etapa, el oído externo (el pabellón) recoge toda la potencia que incide en una superficie de unos 10 centímetros cuadrados. A continuación, la



1. El oído medio transmite los sonidos desde el aire, en el oído externo, hasta el líquido encerrado en el oído interno. La eficacia de esa transferencia de energía de un medio a otro se debe a un dispositivo de efecto palanca en el aparato auditivo, la cadena de huesecillos (*naranja*, *c*). ¡Admirable la evolución que desembocó en estos refinamientos!



2. La membrana basilar de la cóclea se asemeja a una cinta, uno de cuyos extremos esté libre y que divida a la cóclea (aquí extendida) en dos partes. Al hacer que vibre, los sonidos excitan las células ciliadas repartidas en su superficie. La amplitud de las vibraciones depende de la frecuencia sonora y del lugar considerado. Para los sonidos agudos, la vibración de la membrana es máxima (*doble flecha roja*) cerca de la base; para los graves, es máxima hacia el extremo de la membrana.

conduce por el canal auditivo hasta el tímpano, una membrana de unos 60 milímetros cuadrados. Además de concentrar la energía sonora, el canal auditivo, un tubo de unos tres centímetros de diámetro, hace el papel de caja de resonancia dependiente de la frecuencia. Multiplica casi por diez los sonidos agudos (de kilohertz) con respecto a los sonidos graves. Para los agudos, la intensidad sonora aumenta en 20 decibelios al nivel del tímpano: percibimos mejor los agudos que los graves.

El sonido encuentra entonces un obstáculo, ya que se transmite mal del aire al agua, y al revés. El agua es 1000 veces más densa que el aire y mucho menos compresible. Además, para una misma intensidad sonora, la amplitud de las oscilaciones del aire es 60 veces mayor que la del agua, mientras que la amplitud de la presión acústica del aire es, en cambio, 60 veces menor. Las variaciones de presión suficientes para hacer vibrar el aire, en el agua sólo provocan unas débiles oscilaciones. Esas diferencias hacen que una onda sonora que pase del aire al agua sea en su mayor parte reflejada hacia el aire. La presencia de una simple membrana nada cambiaría: al agua sólo se transmite una milésima de la potencia sonora. Dicho de otro modo, la pérdida es de 30 decibelios.

Para paliar esa dificultad, el oído consta de un dispositivo mecánico que actúa como una palanca que reduce el desplazamiento, a la vez que amplifica la presión (*figura 1*). Ese dispositivo incluye la cadena de huesecillos (el martillo, el yunque y el estribo) situados entre el tímpano y la placa del estribo, la cual está en contacto con el fluido fisiológico del oído interno. El efecto palanca se debe a las longitudes desiguales de los huesecillos, así como a que la superficie de la placa del estribo sea 17 veces más pequeña que la superficie útil del tímpano. En resumen, ese dispositivo multiplica por 45 la presión acústica. Se ganan así más de 30 decibelios, que compensan la pérdida debida al cambio de medio.

Llegada al corazón del oído, la onda sonora provoca variaciones rápidas de la presión del fluido contenido en la cóclea, un tubo de 20 a 30 milímetros de largo y arrollado en espiral. Esas variaciones de presión provocan entonces la vibración de un tabique que separa longitudinalmente en dos la cóclea: la membrana basilar. Gracias a esa vibración distinguimos los sonidos. Como la membrana basilar es más ancha y menos gruesa en el extremo que en la entrada, y por otra parte mucho más tendida en la punta que en la base, sus reacciones mecánicas varían según el lugar considerado.

Cómo se detecta el sonido

Experimentando con oídos de mamíferos muertos y construyendo modelos mecánicos, el biofísico de origen húngaro Georg von Békésy (premio Nobel de fisiología en 1961) investigó el comportamiento de la membrana basilar. La onda sonora que se propaga en el líquido fisiológico, de la base hacia la punta de cóclea, excita las vibraciones de la membrana basilar con una amplitud primero creciente. Después, al cabo de cierta distancia, la amplitud disminuye abruptamente. La zona donde es máxima la vibración de la membrana depende de la frecuencia de la onda sonora. Las frecuencias bajas excitan el extremo de la membrana; las frecuencias altas, la base (*figura 2*).

Las células ciliadas que se hallan en la membrana basilar reaccionan a esas vibraciones y las amplifican. Sus cilios acaban el proceso inclinándose algunas milésimas de grado. Basta para producir unas señales eléctricas que los nervios transmiten al cerebro. Merced a todos esos mecanismos, distinguimos cerca de 20.000 sonidos diferentes por su frecuencia o por su amplitud. ¡Cuánto ingenio para escuchar tantas majaderías!

BRUNO VACARO

Ascensores

Suben nuevos diseños

Mark Fischetti

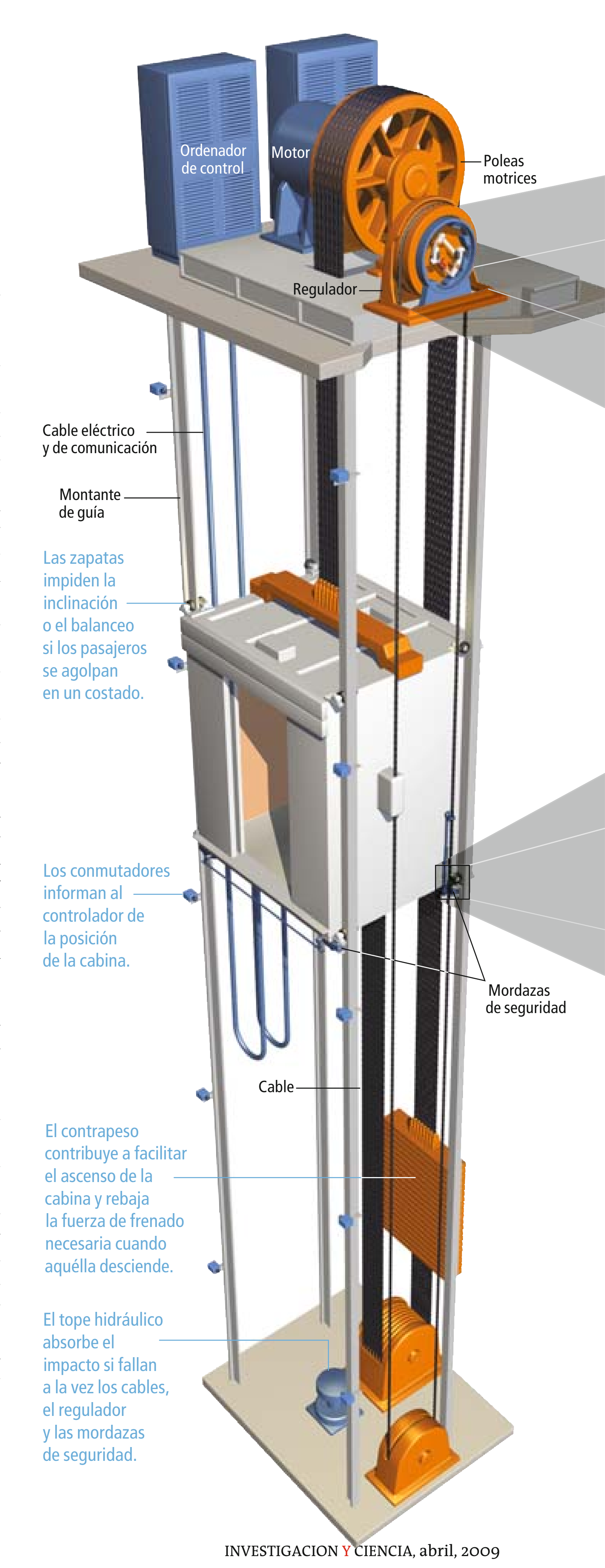
Como negocio, la instalación de ascensores está ya más que desarrollada, pero el encarecimiento de los espacios de oficina y del consumo de energía impone algunos cambios.

La mayoría de los edificios de más de cuatro pisos emplean ascensores de tracción. Un motor eléctrico instalado en el extremo superior del pozo o hueco hace girar una polea múltiple que hace subir y bajar unos cables unidos a la cabina y a un contrapeso. En las máquinas más lentas un juego de engranajes conecta el motor a la polea. En los ascensores más rápidos no hay engranajes: la polea es solidaria del eje del motor.

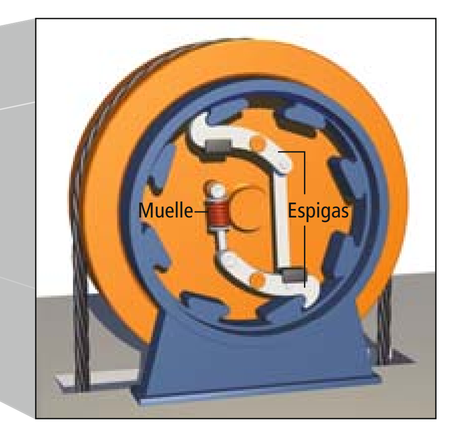
En ambos casos, la maquinaria suele llenar el espacio de una sala encima del pozo o junto a éste, ocupando lo que podría ser la sala principal de un ático. Pero las innovaciones están permitiendo a los constructores hacer caber la maquinaria en la boca del pozo o contra un muro lateral. “De forma gradual vamos evolucionando hacia diseños sin engranajes, de espacio cero”, explica Jeff Blain, director de proyectos en Ascensores Schindler, de la ciudad de Nueva York. Algunas empresas emplean motores sin engranajes de imán permanente, de menor tamaño que los diseños tradicionales pero con la misma potencia. Ascensores Otis, en Farmington, ha sustituido los cables de acero trenzados por correas planas de acero, lo que ha permitido reducir el tamaño del motor y la polea.

Al propio tiempo, los fabricantes aprovechan la gravedad para ahorrar energía. Un contrapeso que pese lo mismo que la cabina al cuarenta por ciento de su plena carga rebaja la potencia necesaria en el motor. Pero cuando tiene que subir un ascensor vacío, la caída del contrapeso más pesado genera demasiada energía; unas resistencias masivas disipan en forma de calor ese exceso de energía. Lo mismo ocurre cuando desciende una cabina llena (que pesa más que el contrapeso). Nuevos accionamientos regenerativos convierten en electricidad la energía sin consumir. “Esa energía se realimenta a la red eléctrica del edificio para volver a emplearla”, dice Leandre Adifon, vicepresidente de ingeniería de sistemas de ascensores en Otis.

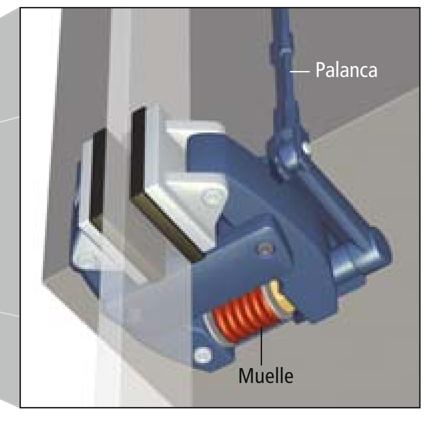
La mejora en los sistemas de distribución está aumentando la eficiencia en el transporte de personas en los edificios de pozos múltiples. En los edificios de oficinas aumenta el número de personas por planta, lo que lentifica el servicio de los ascensores. Para compensar, los fabricantes están sustituyendo en los vestíbulos los botones de “subir” y “bajar” por pantallas de información numeradas o almohadillas táctiles. Quien desea usar un ascensor pulsa el número de su piso; un ordenador le informa entonces de qué ascensor debe tomar, agrupando así las personas que van al mismo piso o a pisos próximos. El ordenador despacha los ascensores de tal modo, que cada uno cubre un tramo reducido de pisos vecinos, sin que viajen al azar hasta arriba del todo y abajo. Este sistema reduce el tiempo de espera y el consumo de energía.



1. EL ASCENSOR DE TRACCION está instalado en la mayoría de los edificios de más de cuatro plantas. La cabina sube y baja merced a unos cables de acero que son arrastrados por el rozamiento en la polea motriz.



2. EL REGULADOR gira por la acción de un cable sujeto a la cabina. Si ésta desciende demasiado rápido, la fuerza centrífuga hace oscilar unas espigas contrapesadas, venciendo el muelle; unos brazos de gancho sujetan la polea, la inmovilizan y tiran de una palanca que acciona las mordazas de seguridad.



3. MORDAZA DE SEGURIDAD.
Las pinzas de la mordaza de seguridad se aferran al montante cuando tira de ellas la palanca del regulador.



4. EL ASCENSOR HIDRAULICO suele instalarse en edificios de cuatro plantas o menos. Para hacer subir la cabina, una bomba impulsa el fluido de un depósito al interior de un pistón telescópico hueco. Para que descienda, se abre la válvula que deja retornar el fluido al depósito.

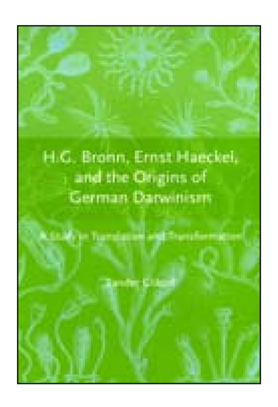
¿SABIA USTED QUE...?

- **EL MAS RAPIDO:** Ascensores Toshiba afirma poseer el ascensor de personas más rápido, instalado en Taipei 101, el edificio de 101 pisos de Taiwán. La velocidad de subida máxima es de 1010 metros por segundo, unos 100 pisos en 26 segundos. Un sistema de soplantes ajusta la presión atmosférica en el interior de la cabina para reducir el chasquido de los tímpanos.

- **ANTE TODO, SEGURIDAD:** Un cable de ascensor está calculado para soportar un 125 por ciento del peso máximo de la cabina; la mayoría de éstas cuelgan de cinco o más cables. El cable de acero se ha hecho tan resistente, que un diámetro de 12 o 16 milímetros basta para una carga de 1600 kilogramos, típica para un edificio de altura media. Las nuevas correas planas de acero de resistencia similar pueden tener un espesor del orden de seis milímetros.

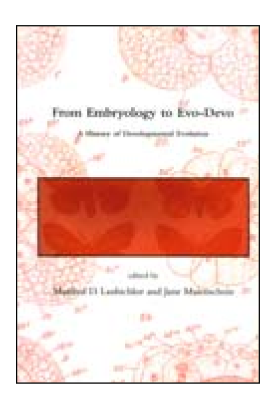
- **CURVAS:** Algunos ascensores Otis se mueven lateralmente para seguir el contorno de estructuras inusuales. Cables acodados tiran de las cabinas a lo largo de raíles inclinados 39 grados (respecto a la horizontal) en el piramidal hotel Luxor de Las Vegas y 30 grados en la Torre Eiffel de París.

GEORGE RETSECK



H. G. BRONN, ERNST HAECKEL, AND THE ORIGINS OF GERMAN DARWINISM. A STUDY IN TRANSLATION AND TRANSFORMATION,

por Sander Gliboff. The MIT Press; Cambridge, Massachusetts, 2008.



FROM EMBRIOLOGY TO EVO-DEVO. A HISTORY OF DEVELOPMENTAL EVOLUTION

Dirigido por Manfred D. Laublicher y Jane Maienschein. The MIT Press; Cambridge, Massachusetts, 2007.

Evo-Devo

Evolución del neodarwinismo y superación de la Teoría Sintética

La paramutación constituye un fenómeno de herencia no mendeliana, causado por modificaciones epigenéticas en el genoma que pasan a la generación siguiente. La comprobación de su existencia, y la de otros fenómenos, instó un profundo replanteamiento del neodarwinismo, doctrina que posibilitó, en los decenios centrales del siglo xx, la consolidación teórica del evolucionismo con las aportaciones de la genética, la paleontología y la sistemática. Mas, avanzados los años setenta, comienza a insinuarse un nuevo marco teórico que da cabida al desarrollo del organismo, a la adquisición de la forma. Nos referimos al Evo-Devo, que abrevia la expresión “biología evolutiva del desarrollo” (*From Embriology to Evo-Devo. A History of Developmental Evolution*). Se funden en el nuevo enfoque dos programas de inquisición, a saber, los análisis de la causación próxima y última de la diversidad de organismos; con otras palabras, desarrollo y evolución.

En 1977, Stephen Jay Gould presentaba, en *Ontogeny and Phylogeny*, el largo recorrido de una relación fascinante. Ese texto, con otros de Bonner, Raff y Kauffman, más las ponencias presentadas en sucesivos congresos internacionales en los decenios subsiguientes, promovieron la creación de un movimiento de investigación sobre los mecanismos del desarrollo y su relación con los mecanismos de la evolución. Se emplearon en un comienzo técnicas de embriología comparada, que paulatinamente dejaron paso a metodologías de biología molecular. De la experimentación y observación emergió un corpus teórico potente, hasta el punto de que, a finales de los años noventa, la biología evolutiva del desarrollo había alcanzado todas las características distintivas de una disciplina autónoma. Contaba con dos revistas, *Evolution & Development* y una sección independiente del *Journal of Experimental Zoology*, titulada *Molecular and Developmental Evolution*. La revista más antigua en el campo de la embriología experimental —*Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen*, fundada en 1894— transformó la cabecera con el nombre de *Development, Genes and Evolution*, otro reflejo del cambio operado.

Frente a la imperante Teoría Sintética, se cuestionó la pretensión de explicar las pautas macroevolutivas como una mera extensión del proceso microevolutivo. Los paleontólogos observaban que el registro fósil de diversos clados mostraba períodos de rápida progresión seguidos por extensos períodos de estasis, lo que llevó a proponer la hipótesis del equilibrio puntuado; los morfólogos comprobaron que el cambio en la forma resultaba de procesos de desarrollo y no dependía de factores génicos. Crecía, además, la desazón ante la pérdida de una perspectiva del organismo en cuanto tal; urgía un enfoque holístico que complementara la escueta determinación genética. Por fin, se recusaba el protagonismo otorgado a la adaptación. En el nuevo papel concedido a los factores internos, el descubrimiento de homeobox supuso un punto de inflexión.

Sabemos hoy que la ontogenia (desarrollo individual) no recapitula la filogenia (transformación evolutiva), contra lo afirmado en el dictum famoso de Ernst Haeckel y sugerido por el propio Darwin, ante los estadios de desarrollo de los percebes. Sobre la relación entre ambos biólogos, suele repetirse que se debe a Haeckel la introducción del darwinismo en Alemania. Nada más alejado de la verdad (*H. G. Bronn, Ernst Haeckel, and the Origins of German Darwinism. A Study in Translation and Transformation*). La traducción germana de *El origen de las especies* apareció en 1860, meses después del original, realizada por Heinrich Georg Bronn, paleontólogo de prestigio, tras dedicarle al original inglés una reseña generosa en la revista de geología que dirigía. La versión de Bronn, con sus anotaciones y comentarios, influyó en la manera en que el libro se recibió y asimiló en la comunidad científica centroeuropea. Haeckel conoció a Darwin a través de esa traducción.

Bronn había nacido en 1800 cerca de Heidelberg, en el seno de una familia católica. Se graduó en la Universidad de Heidelberg, donde desarrolló su carrera docente, que compaginó con su trabajo paleontológico de campo en Italia y en Europa occidental, identificando y secuenciando estratos de rocas sedimentarias y los fósiles incluidos. En *Handbuch einer Geschichte der Natur*, aparecido en los años cuarenta, ofreció un estudio pormenorizado del registro fósil con una crítica objetiva de sus limitaciones y deficiencias. Aportaba información sobre biogeografía, analizaba los métodos de mejora vegetal y animal, y subrayaba la ubicuidad de la adaptación al medio. Bronn defendía que la naturaleza podría someterse a regularidad y leyes, sin dejar por ello de producir diversidad de formas. La de Bronn era una teoría sucesional, no una teoría transformista; cada especie vivía hasta que el gradual cambio geológico y ambiental, incluidos cambios en la flora y en la fauna con

las que interaccionaba, hacían imposible su existencia. No admitía, empero, las extinciones catastróficas en masa. Los datos estratigráficos le mostraban que cada especie aparecía o desaparecía individualmente.

Darwin y Bronn compartían una visión histórica de la vida; previeron, además, que las claves de la naturaleza y causas del cambio histórico emergerían no sólo de la paleontología y la morfología comparada, sino también de los estudios sobre la variación, la distribución geográfica, la interacción organismo-entorno. Ambos rechazaban las tesis catastrofistas de sucesivas extinciones en masa y creaciones subsiguientes, así como la teoría transformista de Lamarck. Las causas del cambio orgánico debían contemplarse en un medio externo y no en leyes internas de arquetipos transcendentales. Cada uno, por fin, conocía el trabajo del otro. En el *Handbuch*, la autoridad aceptada en biogeografía y geología uniformitarista es Darwin. A su vez, ese *Handbuch* constituye una de las obras más anotadas de la biblioteca personal del inglés. A finales de los cincuenta Bronn y Darwin avanzaron sus respectivas teorías sobre la historia orgánica. La de Bronn ganó el premio de la Academia Francesa de Ciencias en 1857 y apareció el año siguiente en el marco de sus *Untersuchungen über die Entwickelungs-Gesetze der organischen Welt* (Investigaciones sobre las leyes del desarrollo del mundo orgánico); ese mismo año, Darwin y Alfred Russel Wallace presentaron su teoría de la evolución por selección natural. Bronn nunca se mostró plenamente convencido de la transformación de las especies. A su muerte, en 1862, la bandera darwinista la enarboló Haeckel.

En 1866 Haeckel respondía al reto de unificar la biología a través de la teoría mecanicista de la evolución darwinista y de la visión materialista de Virchow sobre la célula. A finales de ese mismo decenio, Alexander Kowalevsky descubrió semejanzas entre las secuencias ontogénicas de *Amphioxus* y las de vertebrados, así como la existencia de una *chorda dorsalis* en las larvas de las ascidias. Estos descubrimientos sugerían que los vertebrados derivaban de larvas de ascidias, una teoría que fue pronto cuestionada, entre otros por Anton Dohrn, quien propuso un antepasado anélido de los vertebrados. En 1872, en un libro sobre la clasificación de esponjas calcáreas, Haeckel dedicó una sección entera a la "ley biogenética" y, en 1874, combinando la lógica de esta ley biogenética con su convencimiento de que la invaginación constituía el genuino mecanismo primitivo de la formación de la capa germinal, detalló su atrevida extrapolación del antepasado de los metazoos en su teoría de la gastrea.

Pero, ¿sirven las células como agentes causales en la morfogénesis? Edmund Beecher Wilson sostenía en su *The Cell in Development and Inheritance* (1896) que las células ejercen una fuerza causal significativa en el desarrollo y la diferenciación. La teoría celular y la evolución aportaban los dos fundamentos de la biología. Para Wilson, la división celular entrañaba la diferenciación; las series de divisiones celulares conducían a un proceso gradual y epigenético de morfogénesis. Wilhelm Roux adoptó una versión extremista de la tesis de la división celular como causa del desarrollo de la forma. Su integración en mosaico implicaba parcelar el material heredado y diferenciado para cada célula, de suerte tal, que cada división celular resultara en especialización y localización de células. Desde un flanco alternativo, Thomas Henry Huxley declaraba que las propiedades del protoplasma y los factores evolutivos promovían el desarrollo. Charles Otis Whitman estaba de acuerdo con Huxley: la organización no era producto de la formación celular, sino que la precedía y la regulaba. Y Charles Manning Child apoyaba a Whitman; la morfogénesis venía instada por gradientes internos establecidos por factores nucleares y citoplasmáticos.

En la primera mitad del siglo XX hubo intentos de levantar puentes que permitieran poner en conexión herencia, desarrollo y evolución: Hermann Braus, Richard Goldschmidt, Boris Ephrussi, C. H. Waddington, L. C. Dunn, Salome Glücksohn-Waelsch e Ivan Schmalhausen. Sin embargo, ninguno de ellos dio origen a un programa sólido y sintético, aun cuando aportaran experimentos novedosos e hipótesis sugestivas. Braus intentó, por ejemplo, un programa de *morfología experimental* que ofrecía una esperanzada promesa de resolver el origen de las extremidades. Y no debemos olvidar el trabajo contemporáneo de William Bateson en la historia de la biología de la forma. Expuso una teoría vibratoria para explicar la transmisión de la forma del organismo y los cambios operados mediante la interacción entre las propiedades materiales y el medio externo. En 1925 Ross Harrison urgía una vuelta a la embriología. El concepto de "organizador", entonces en boga, traía consigo la promesa de enfoques analíticos del desarrollo. Hacia 1936, la teoría del organizador había dejado paso al concepto de inducción. La embriología había ido mucho más lejos que el estudio de la evolución.

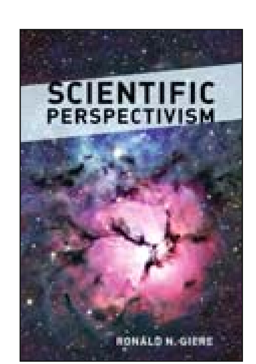
John Tyler Bonner publicó en 1952 *Morphogenesis: An Essay on Development*, medio siglo después de la obra de Wilson *The Cell* y medio siglo antes del entusiasmo en torno al Evo-Devo. Bonner no pretendía dar respuesta al problema de la forma, pero supo enfocar su situación, es decir, atender a los factores principales subyacentes bajo el patrón de desarrollo. Abordó el problema en términos de crecimiento, movimientos morfogenéticos y diferenciación. El crecimiento es el proceso básico y, por sí mismo, no comporta morfogénesis ni diferenciación. Las pautas de movimientos morfogenéticos conducen a la diferenciación, definida por las divergencias en partes, en razón de la composición química y de las posiciones y necesidades del organismo. En resumen, para Bonner, las células no causan la morfogénesis (frente a la tesis de Wilson y Roux), ni son meros epifenómenos (frente a la tesis de Huxley y Whitman), sino que las células y las interacciones celulares son los participantes primeros en los procesos que configuran al organismo, pero los procesos vienen condicionados por la genética y por la adaptación.

Desde muy pronto la cartografía acompañó a la embriología clásica con eficacia tal, que ni la biología del desarrollo, ni la genética del desarrollo ni la biología evolutiva del desarrollo, han querido prescindir de su empleo. E. G. Conklin levantó en 1933, con datos recogidos en Woods Hole en 1905, mapas del destino de las hojas embrionarias. De la comparación de mapas de destino se infiere el cambio evolutivo. Se adelantó en 1962 T. C. Tung. Comparó el mapa de destino (creado con la aplicación de un colorante) de *Amphioxus* con el mapa de destino del tunicado *Ciona*. Los resultados mostraron semejanzas que no cabía esperar a partir de la escueta división celular pero sí eran esperables desde la filogenia evolutiva. En 1990, Gregory Wray y Rudy Raff compararon, ya en pleno Evo-Devo,

mapas de destino para poner de manifiesto los cambios en el destino del blastómero durante el desarrollo precoz de erizos de mar; demostraron que el mapa de destino del crecimiento directo de los erizos se había cambiado en el sentido de que las células que habrían de formar el ectodermo larvario formaban ahora las estructuras vestibulares del adulto. Se habían alterado también los precursores neuronales. El hecho de que tales especies divergieran hace diez millones de años evidenciaba que puede producirse un cambio drástico en el desarrollo mediante la alteración precoz en las fases iniciales del desarrollo, fenómeno reputado hasta entonces por imposible.

Del tronco de la cartografía de destino brotó la cartografía de patrones de expresión génica. Hay diversas formas de cartografiar la expresión génica. La vía habitual es la hibridación in situ. A comienzos de los años ochenta, las pruebas de biología del desarrollo consistían en bandas sobre geles. Desde el decenio siguiente, las pruebas consisten en granos radiactivos sobre láminas microscópicas o productos cromáticos en el embrión. Los mapas de expresión génica tienen importancia capital Uno de sus resultados fue mostrar que las unidades de construcción embrionaria no necesitaban ser las mismas que las unidades de función adultas. Por tanto, compartimentos, rombómeros, varillas internas, parasegmentos y nudos de esmalte son regiones anatómicas de expresión génica y función que no guardan una correlación anatómica obvia en el adulto. Esas regiones que expresan genes resultan decisivas en la construcción del organismo. Sin los mapas de pautas de expresión génica no nos hubiéramos percatado de ello. Si sabemos, por ejemplo, que los genes *Brachyury* y *Twist* se expresan en las células mesodérmicas de *Xenopus* y de *Drosophila*, podemos dirigir nuestra mirada hacia las células que transcriben esos genes y conocer que se convertirán en mesodermo.

Luis Alonso



SCIENTIFIC PERSPECTIVISM,

por Ronald N. Giere. University of Chicago Press; Chicago, 2006.

Praxis científica

Oposición al realismo duro de ciertos filósofos de la ciencia

Cuando en los años setenta del siglo XX algunos afirmamos que la praxis científica era tanto un hacer como un producto de algunos miembros de la especie humana, se consideró una afirmación "heterodoxa", contrapuesta a lo que después se calificó de *concepción heredada*. Hoy aparece como una posición aceptada mayoritariamente, englobada en lo que se califica de *enfoque naturalista*, aunque en ese enfoque caben multitud de líneas. A destacar, entre ellas, las constructivistas no puramente sociales o antropológicas. En cualquier caso, todas se oponen, de una u otra manera, al realismo duro de muchos filósofos de la ciencia. Una escisión, realismo-naturalismo, que ha provocado amplia literatura que refleja cierta dosis de esterilidad, de poco pensamiento auténticamente productivo u original.

Tratando de mantenerse un tanto neutral entre los excesos del realismo y los del constructivismo —especialmente del constructivismo social— Ronald Giere pretende dar un aporte positivo a la filosofía de la ciencia adoptando una posición que califica de *perspectivismo*. Y lo hace, realmente, en el marco de un naturalismo más metodológico que metafísico u ontológico.

Muy en esquema, la idea de Giere es que se puede considerar un objeto, una escena, desde varios puntos de vista, con lo cual se provocan distintas perspectivas de ese objeto o esa escena. Es la posición que considera que debe aplicarse a la praxis científica para obtener vistas, diferentes perspectivas de la misma. Aunque no hace referencia a este hecho, en la literatura esta posición fue muy cultivada hacia los años cuarenta del siglo XX por novelistas americanos como Faulkner —*Mientras yo agonizo*— y, de modo independiente en España, por Pedro de Lorenzo —*La quinta soledad*.

Giere aplica el perspectivismo para analizar la práctica científica con dos objetivos explícitos. En primer lugar, que se admita que en la ciencia está presente, siempre, algún grado de contingencia. Es decir, que las exigencias científicas ni son tan objetivas como lo piden los realistas, ni están tan absolutamente determinadas por los factores sociológicos como sostienen algunos constructivistas sociales y antropológicos.

En segundo lugar, para sostener que la ciencia sólo puede proporcionar un realismo perspectivo. En consecuencia, su posición se enmarca en una línea metodológica desde la que se combaten todas aquellas pretensiones de alcanzar un conocimiento absoluto, esté apoyado este en la religión, la política o la propia ciencia. En otras palabras, para Giere las ciencias no son la materialización de unos sueños metafísicos previos, sino que son prácticas que vienen condicionadas por problemas históricamente planteados y, por ello, no son más que construcciones humanas.

Si estas son las líneas quizá centrales de su concepción, lo que da valor a este libro es que la apoya en la praxis científica contemporánea que trabaja la problemática de la visión del color. Desde un estudio de este fenómeno pasa a debatir alguno de los grandes temas del pensamiento científico como el de la observación y, a su través, a mantener que tanto los modelos como las teorías son también construcciones perspectivas. Puede condensarse la idea de Giere afirmando que, para él, el conocimiento científico es, en su totalidad, un saber que puede calificarse de perspectivo.

Una obra breve muy bien escrita, en la cual las notas enriquecen el texto al igual que los gráficos y las doce láminas en color. Obra de interés, como las anteriores de Giere, constituye un verdadero reto para contraponer ideas, para establecer nuevas perspectivas a los argumentos a veces muy provocativos del autor.

Javier de Lorenzo

Un dardo cuántico contra la relatividad especial,

por David Z Albert y Rivka Galchen

Lo mismo que otros efectos cuánticos, el entrelazamiento viola algunas de nuestras intuiciones más profundas en torno al mundo. Puede incluso socavar la teoría de la relatividad especial de Einstein.



La rareza de las especies,

por José María Rey Benayas

Una especie es rara o común según su extensión geográfica, abundancia local, especificidad del hábitat y ocupación de éste. El estudio de la rareza nos informa sobre la biodiversidad y facilita la planificación de acciones conservacionistas.

Salvar las neuronas nuevas,

por Tracey J. Shors

En el cerebro de un adulto se generan cada día neuronas nuevas. Estas células acaban participando en complejas tareas de aprendizaje. Cuanto más se las exige, con tanta mayor fuerza crecen.

Longevidad del transistor,

por Robert W. Keyes

La unidad básica de la revolución informática ha cambiado de forma, material y fabricación, pero durante medio siglo nada ha podido reemplazarla.





Energías de fuentes renovables,

por Matthew L. Wald

La necesidad de afrontar el cambio climático y de asegurar el aprovisionamiento energético torna crucial la búsqueda de sustitutos para los combustibles fósiles.